

공학석사 학위논문

수평축 풍력발전용 터빈의 3차원  
유동특성 및 성능평가에 관한 연구

**A Study on 3-D Flow Characteristics and Power  
Performance for HAWTs  
(Horizontal Axis Wind Turbines)**

지도교수 이 영 호

2003 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 범 석

# 목 차

Abstract .....	i
Nomenclature .....	iii
제 1 장 서 론 .....	1
1-1 풍력발전 .....	1
1-2 연구동향 .....	4
1-3 연구목적 .....	5
제 2 장 풍력 가용량 선정 및 분석 .....	7
2-1 측정높이의 보간 .....	8
2-2 풍속분포 .....	13
2-3 <b>Weibull</b> 분포의 적용 .....	18
제 3 장 로터 블레이드 설계 및 이론적 성능해석 .....	26
3-1 로터 블레이드 설계 .....	26
3-1-1 로터 블레이드 날개 수와 성능 .....	26
3-1-2 날개의 단면 형상 .....	30
3-1-3 로터 블레이드의 크기 선정 .....	31
3-1-4 형상설계 .....	34
3-2 이론적 성능해석 .....	36

3-2-1	<b>Momentum</b> 이론	36
3-2-2	<b>Actuator Disk</b> 이론	36
3-2-3	<b>Annular Momentum</b> 이론	42
3-2-4	<b>Blade Element Momentum</b> 이론	44
3-2-5	<b>Strip</b> 이론	46
3-3	실속 후 공력특성 예측	49
3-4	로터 블레이드 형상 최적화	51

#### 제 4 장 **Gurney flap**을 장착한 익형의 공력특성

4-1	<b>Gurney flap</b>	55
4-2	익형의 형상정의 및 계산조건	56
4-2-1	익형의 형상정의	56
4-2-2	<b>Bench Mark</b> 계산	59
4-2-3	계산조건	63
4-3	결과 및 고찰	65

#### 제 5 장 **CFD**에 의한 3차원 **TUDelft T40/500** 모델의 수

	치해석	73
5-1	형상모델링 및 계산격자	73
5-1-1	T40-500 로터 블레이드 3-D 모델링	73
5-1-2	계산격자의 생성	76

5-2	경계조건 및 계산조건 .....	79
5-3	결과 및 고찰 .....	82
5-3-1	Wake 구조에 대한 유동해석 .....	82
5-3-2	블레이드 표면 3차원 실속 현상 .....	88
5-3-3	블레이드 주위 및 표면 압력분포 .....	97
5-3-4	T40/500 로터 블레이드의 성능평가 .....	104

제 6 장	<b>CFD</b> 에 의한 2 블레이드 풍력발전용 터빈 모델의 수치해석 .....	112
6-1	형상모델링 및 계산격자 .....	113
6-1-1	로터 블레이드 3-D 모델링 .....	113
6-1-2	계산격자의 생성 .....	115
6-2	수치해석기법 및 계산조건 .....	117
6-2-1	수치해석기법 .....	117
6-2-2	경계조건 .....	117
6-2-3	계산조건 .....	118
6-3	결과 및 고찰 .....	118

제 7 장	결론 .....	130
-------	----------	-----

참고문헌 .....	132
------------	-----

학술 활동

감사의 글

# **A Study on 3-D Flow Characteristics and Power Performance for HAWTs (Horizontal Axis Wind Turbines)**

***BeomSeok, KIM***

*Department of Mechanical Engineering  
Graduate School, Korea Maritime University*

## **Abstract**

Various theoretical design techniques to reflect loss factors are reviewed for the optimum design of rotor blade of HAWTs(Horizontal Axis Wind Turbines). Also, wind resources in Korea Maritime University is investigated for the design of offshore wind farm in the future. Estimation of average wind speed is  $4.76 \text{ m/s}$  and it's electric power productive capacity is  $32.78 \text{ W/m}^2$ .

A CFD study on the aerodynamic characteristics of NACA 63215 airfoil, with some kind of flaps at trailing edge has been performed to know the effect of various flaps. In case of 1.5% height flap of chord length with  $90^\circ$  attachment, lift to drag ratio of NACA 63215 airfoil shows the highest value.

The estimated performance and flow characteristics have been obtained from numerical simulation for two and three blades type HAWT model which was designed by Delft University of Technology in Netherlands. The comparison between BEM and CFD results indicates a good agreement within an error of less than 10%. The numerical simulation results on the complex 3-D stall shows a good agreement with inviscid stall model and calculated wake distribution of two blades type rotor shows the similar pattern of the smoke visualized result from NREL(National Renewable Energy Laboratory).

## Nomenclature

$A$	:	Rotor Swept Area
$AR$	:	Aspect Ratio
$a$	:	Axial Interference Factor
$a'$	:	Angular Interference Factor
$C$	:	Scale Parameter
$c$	:	Chord Length
$C_{P \cdot \max}$	:	Maximum Power Coefficient
$C_p$	:	Power Coefficient
$C_L$	:	Lift Coefficient
$C_{D \cdot \max}$	:	Maximum Drag Coefficient
$C_{Ds}$	:	Drag Coefficient at Stall Angle
$D$	:	Drag Force and Diameter
$dT_m$	:	Local Thrust
$dQ_m$	:	Local Torque
$F_t$	:	Wing Tip Loss Factor
$h$	:	Height
$h_g$	:	Average Height
$K$	:	Shape Parameter
$LF$	:	Load Factor



$L$	:	Lift Force
$m$	:	Mass Flow Rate
$N$	:	Number of Blade
$P$	:	Pressure
$P_e$	:	Power from Wind Turbine
$P_w$	:	Power from Wind
$P_{w \cdot ave}$	:	Average Power from Wind
$P_{e \cdot ave}$	:	Average Power from Wind Turbine
$P_{e \cdot rated}$	:	Rated Power from Wind Turbine
$P_R$	:	Rated Power
$P_{w \cdot max}$	:	Maximum Power from Wind
$Q$	:	Torque
$R$	:	Blade Radius
$Re$	:	Reynolds Number
$r$	:	Local Blade Radius
$T$	:	Thrust
$V_c$	:	Cut-In Wind Velocity
$V_i$	:	Free Stream Wind Velocity
$V_R$	:	Rated Wind Velocity
$WF$	:	Wind Factor
$W$	:	Relative Velocity

$Z_0$  : Roughness Length

## Greek Letters

$\alpha$  : Angle of Attack

$\alpha_s$  : Stall Angle

$\eta_m$  : Efficiency of Gear Box

$\eta_g$  : Efficiency of Generator

$\rho$  : Air Density

$\lambda$  : Tip Speed Ratio

$\lambda_{local}$  : Local Tip Speed Ratio

$\Omega$  : Angular Velocity

$\omega$  : Angular Velocity of Wake

$\sigma_L$  : Local Solidity

$\phi$  : Flow Angle

$\theta$  : Pitch Angle

## 제 1 장 서 론

### 1-1 풍력발전

최근 국제적으로 거론되고있는 기후변화 협약 및 각종 국제 협약으로 인한 환경문제의 심각성에 대한 관심이 상당히 높아가고 있으며, 1970년대 유류파동 이후, 전 세계적으로 안정적인 에너지원의 확보에 대한 심각한 필요성을 지각하게되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 세계 에너지 소비량은 1950년 이후부터 연 3.9%씩 급격히 증가하여 1990년에는 1950년 소비량의 4.7배로 증가하였다. 제 2차 세계 대전 후의 세계적인 공업화 추세와 인구증가 등의 원인에 의하여 화석에너지의 사용량이 급격한 비율로 증가하였다. 세계의 총인구는 현재 60억 명으로써 년 1.7%씩 증가하고 있으며, 현재의 증가속도라면 40년 후에는 2배로 증가할 것으로 전망되며, 다시 한번 심각한 에너지 위기가 닥칠 것이라고 전망된다.

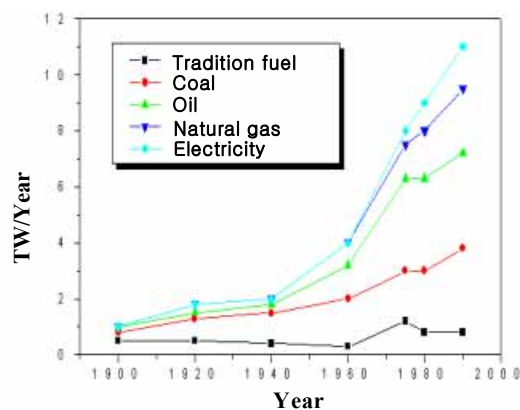


Fig. 1 World wide energy consumption trend curve

차후, 에너지 기기의 효율이 향상되고, 재활용 등에 의한 에너지 절약 성과가 계속 나아진다고 하더라도, 이러한 인구증가와 개발도상국의 공업화에 의한 에너지 수요의 증대 추세는 피할 수 없을 것으로 생각된다. 따라서, 21세기에 있어서의 전 세계 에너지 수요량이 2060년에는 현재의 2배에 이를 것으로 예측되고, 2100년에는 선진국의 에너지 절약과 개발도상국에 있어서의 인구 억제정책이 순조롭게 추진된다고 하더라도 에너지 수요량은 약 30TW/Year에 달할 것으로 예측되므로, 이제는 더 이상 유한 에너지자원인 화석연료에만 의존할 수 없다는 것은 자명한 일이다. 이미, 화석연료의 유한성과 지구 환경문제의 심각성을 지각한 선진국가들을 중심으로 새로운 에너지를 확보하기 위한 신 재생 대체에너지 개발에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 대체 에너지가 차지하는 비중은 2010년까지 전 세계에너지 소비량의 약 4.7%를 담당 할 것으로 전망되고 있다. 대체 에너지로써 풍력, 파력, 태양열, 지열 등 다양한 종류의 발전방식들 중, 현재 가장 효율적이고 경제적으로 에너지를 공급할 수 있는 방식이 풍력 발전이다.

풍력발전이란, 바람의 운동에너지를 이용하여 회전자를 구동시키고, 이때 발생한 회전력을 이용하여, 발전기를 통해 전기에너지를 얻는 무공해 신 재생에너지 발전방식을 말한다. 풍력발전의 가장 큰 매력은 무공해 청정에너지 자원인 바람을 무한히 얻을 수 있다는 것이다. 실제 전 세계 곳곳에 산재한 전체 풍력에너지의 단, 1%만을 이용할 수 있다면, 인류의 에너지 문제를 해결 할 수 있으며, 황 및 질소 산화물은 9g/kWh, 중금속류 0.1g/kWh, 이산화탄소 0.5~1.9g/kWh, 입자물질 200g/kWh 등의 공해물질 발생을 억제 할 수 있는 효과 또한, 국제적인 온실가스 배출 억제분위기에 능동적으로 대처 할 수 있

는 커다란 장점이 될 수 있다[1]. 하지만, 풍력발전은 풍향과 풍속이 자주 바뀌고 지속적이지 못하다는 단점을 가지고 있어 동력원으로서의 전환에 많은 기술이 필요하여 상대적인 발전단가 상승을 초래한다. 하지만, 최근의 중·대형급 수평축 풍력발전용 터빈에 대해, 집중적인 연구투자에 힘입어 급진적인 기술개발을 이룰 수 있었고, 다양한 시스템을 갖춘 풍력발전 단지조성의 결과, 에너지 대량생산 능력을 확보하게 됨으로써 현재의 발전단가에 근접한 수준까지 도달 할 수 있었다.

국내에서도 유류파동 이후 대체에너지에 대한 관심을 갖고 풍력발전에 대한 연구를 시작하였으며, 1975년 한국과학기술원(KAIST)에서 경기도 화성군에 설치한 2kW급 풍력발전용 터빈이 국내 풍력발전의 효시이며, 1990년대 이전까지 모두 20여기의 풍력발전용 터빈이 설치되었으나, 지속적인 연구개발의 부족과 관리부족으로 인하여, 별다른 성과를 올리지 못하고 철거된 상태이다[2]. 그러나 최근 국내에서도 신뢰성 있는 선진 외국의 풍력시스템을 도입하여 한국형 풍력발전기에 대한 연구개발 및 시험 운전 등이 제주도의 행원 지역, 강원도 대관령, 포항 호미곶 등의 풍황자원이 우수한 지역을 중심으로 진행되고 있으며, 한국에너지기술연구소가 풍력발전용 터빈의 운전특성에 대한 각종 측정 및 분석을 담당하고 있다. 하지만, 현재의 국내 기술수준은, 이미 관련 기술개발 및 평가 작업을 마치고 실용화되어 대체 에너지 공급원으로써 상당한 기여를 하고있는 선진외국의 실정에 비하여 상당히 미흡한 수준이다.

우리나라는 삼면이 바다로 둘러 쌓여있으며, 비교적 우수한 풍황자원을 확보하고 있다고 평가된다. 따라서, 이러한 지리적 이점을 충분히 활용하고, 지속적인 연구개발에 대한 관심과 국가적인 투자가 뒤

따른다면, 매년 소비되는 막대한 에너지의 대부분을 수입에 의존하는 현재의 실정을 비추어 볼 때, 풍력발전은 에너지 자급도 향상에 상당한 기여를 할 것임에 틀림없으며, 국가 경쟁력 향상에 상당한 기여를 할 것으로 생각된다.

## 1-2 연구동향

풍력발전에 관한 연구는 넓은 관점에서 로터 블레이드의 공력설계 및 성능 평가 작업을 담당하는 유체분야, 로터 블레이드와 타워부분의 재료적 안정성을 검토하는 재료분야, 그리고 로터 블레이드로 부터 얻은 회전력을 최종적으로 전기에너지로 변환하는 기술과 관련한 전기 분야 등으로 구분될 수 있다. 본 연구에서는 풍력발전용 터빈의 3차원적 유동해석과 성능평가 등에 관한 유체분야의 연구 동향에 한하여 살펴본다.

Kentfield 등[3]은 1994년에 Gurney flap의 장착에 의한 풍력발전용 로터 블레이드의 양항비 상승에 대한 이론적, 실험적 연구를 수행하였으며, 1997년에 로터 블레이드의 성능을 크게 좌우하는 익형의 양항비(lift to drag ratio) 상승에 대한 최적 Gurney flap 크기에 관한 연구가 Phillippe 등[4]에 의하여 수행되었다. 2000년에는 Duque 등[5]에 의하여 풍력발전용 로터 블레이드의 3차원적 유동특성과 성능평가를 목적으로, 상용 CFD(computational fluid dynamics) 코드의 적용성에 대한 검토가 이루어 졌으며, Kikuyama 등[6]에 의하여 불규칙적으로 유입되는 바람에 대한 수평축 풍력발전용 터빈의 공기역

학적 해석에 관한 연구가 수행되었다. 2001년에는 Corten 등[7]에 의하여 수학적 모델을 통한 접근 방법으로, 로터 블레이드 표면에서 발생하는 3차원 실속(stall) 현상의 유동메커니즘을 규명하고자하는 연구가 행하여졌으며, 또한 2002년에는 Leishman 등[8]에 의하여 풍력 터빈의 비정상 3차원 성능 특성을 정확하게 예측하는데 있어서, 현재 설계자들이 주로 사용하는 설계 기법인 BEM(blade element momentum theory)법과 최근 시도되고 있는 CFD 기법 등에 대한 평가를 수행하였으며, 비정상 후류 모델을 위한 와류법 등 다양한 수학적 모델을 제시하고 있다. 그리고 국내에서는 수평차 회전익의 성능 해석에 관한 연구가 Omar 등[9]에 의해 1994년에 수행되었고, 1999년에는 이동현 등[10]에 의해 풍력터빈용 날개의 공력해석 및 설계에 관한 연구가 수행된바 있다.

### 1-3 연구목적

지금까지 풍력발전용 터빈에 대한 성능 평가 작업은, 실제 원형(prototype)을 제작하여 실 운전 조건 하에서 실험을 수행(field test)하거나, 원형을 대규모 풍동에 설치하고 진행되는 실험적 기법에 의존하여 왔다. 이러한 실험적 기법들은 상당히 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으나, 소규모 단일 연구 그룹에 의하여 수행되기에는 경제적 손실이 상당하므로, 몇몇 연구기관을 제외하고는 이러한 테스트를 수행할 엄두를 내지 못하는 실정이다.

최근 들어 눈부신 성장을 하고 있는 CFD는 다양한 분야에 걸쳐

상당한 기여를 하고 있으며, 특히 항공산업에서 항공기 공력설계 등의 목적으로 크게 활용되고 있다. 항공기 날개의 2차원 단면 형상은 익형들로 이루어져있으며, 풍력발전용 터빈 블레이드의 2차원 단면 형상 또한 마찬가지로 익형이다. 따라서, 이미 항공산업에서 그 신뢰성을 인정받고 있는 CFD 기법은 풍력발전용 터빈의 성능을 평가하는 도구로써의 가능성 또한 가지고 있다.

본 연구의 목적은 다음과 같이 크게 네 가지로 구분될 수 있다.

첫째, 우리나라의 풍황자원을 바탕으로 최적화된 풍력발전용 로터 블레이드를 설계할 수 있는 이론적 설계기법을 확립한다.

둘째, 선행된 한국해양대학교내 풍황자원 분포에 관한 연구를 바탕으로 풍력발전용 로터 블레이드 설계시 필요한 데이터로 재 가공하여, 차후 수행될 한국해양대학교 해상풍력발전 단지 조성을 위한 기초자료로 활용한다.

셋째, 다양한 형태의 Gurney flap을 장착한 익형에 대한 수치해석적 연구를 통하여, 보다 우수한 성능을 가지는 로터 블레이드를 설계하기 위한 기초자료로써 활용한다.

마지막으로 상용 CFD 코드를 이용하여 네덜란드 Delft 대학[11]의 풍력에너지 연구그룹에 의해 설계된 500kW급 3 블레이드 수평축 풍력발전용 터빈(horizontal axis wind turbines, HAWTs)과 비교적 간단한 형상의 2블레이드 수평축 풍력발전용 터빈을 대상으로 수치해석적 연구를 수행하여 3차원적 유동해석 및 성능 평가에 대한 상용 CFD 코드의 적용가능성 평가에 대한 연구를 목적으로 한다.



## 제 2 장 풍력가용량 선정 및 분석

풍력발전 시스템의 성공적인 설계 및 운영을 위해서는 다양한 설계 변수들을 고려한 설계가 필수적이지만, 무엇보다도 풍력발전용 터빈이 설치, 운용될 장소의 풍황자원에 대한 철저한 조사가 선행되어야만 한다. 아무리 훌륭한 풍력발전용 터빈이 설치되더라도, 그 지역에서의 바람이 터빈의 정격출력을 낼 수 있을 만큼 지속적으로 불어오질 않는다면, 이는 커다란 경제적 손실이 아닐 수 없다. 따라서, 반드시 풍력발전용 로터 블레이드를 설계함에 있어서 설치하고자 하는 입지 선정의 중요성을 인식하고, 수 십년간 축적된 그 지역의 풍황자원 데이터를 바탕으로 로터 블레이드의 설계 및 제작에 착수해야 할 것이다.

본 장에서는 이미 설동일 등[12]에 의하여 수행된 한국해양대학교 풍황자원 조사 데이터를 바탕으로, 앞으로 진행될 한국해양대학교 내 해상 풍력발전 단지의 조성을 위한 기초적 풍황자원 검토 및 분석을 행하였다.

## 2-1 측정높이의 보간

풍속은 지표면, 해면 또는 지형지물 등과의 마찰로 인하여 지상으로부터의 높이에 따라 변하게 되며 대기 경계층을 형성하게 된다. 이러한 지표면상의 저항에 따라 발생된 풍속분포에 따라 대기권은 저층, 하부 마찰층, 상부 마찰층 및 자유대기층으로 구분할 수 있다.

지상 1,000 m 이상의 자유대기층에서는 지표면과의 마찰력이 거의 작용하지 않으며, 이 이하의 높이에서는 지표면과의 마찰력에 의해 지상에 가까울수록 풍속이 낮아지게 된다. 이러한 근거로 인해 한국 해양대학교 풍속자료는 실측높이 15 m 높이에서 측정되었다. 보통 풍력발전용 터빈을 설치하고자 하는 지역의 풍속을 측정하고자 할 때, 실제 설치될 풍력발전용 터빈의 허브 높이와 동일한 높이에서 풍속측정을 하는 것이 가장 효과적인 방법이다. 하지만, 고도가 높아질수록 풍속측정용 마스트(mast)를 설치하는 비용이 늘어나고, 고도의 변화에 따라 매번 동일한 측정을 한다는 것은 상당히 비효율적인 일이므로, 임의의 지점에서 측정된 풍속데이터를 원하는 위치에서의 풍속데이터로 변화하는 보정 식을 사용하여, 풍속자료를 얻는 방식이 일반적이다.

보통, 정상적인 대기 경계층 내에서는 식(2.1) 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

$V$	:	실측높이의 풍속
$V_0$	:	측정된 높이에서의 풍속
$h$	:	실측높이
$h_0$	:	측정높이
$\alpha$	:	표면 거칠기에 의존하는 인자

$\alpha$ 는 일반적인 지표면 난류 경계층에서는 0.143(1/7)의 값을 갖지만, 주변의 지형이나 높이, 일사조건 등 여러 가지의 주변 환경요소에 의해 결정된다.

본 연구에서는 가장 오차가 적고 보정이 용이한 수정지수모델(modified power law model)을 이용하여, 식 (2.2), (2.3), (2.4)와 같은 관계식에 의해 측정높이와 보정높이와의 풍속관계를 설정하였다.

$$\alpha = a + b \ln(V_0) \quad (2.2)$$

$$a = \frac{1}{\ln\left(\frac{h_g}{Z_0}\right)} + \frac{0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_0}{10}\right)} \quad (2.3)$$

$$b = \frac{-0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_0}{10}\right)} \quad (2.4)$$

여기서,  $h_g = \sqrt{h \times h_0}$ 는 기하학적 평균높이 ( $m$ )

위의 관계식에 의해 실제 측정 높이에서 임의의 높이에 대한 보정이 가능하게 된다. 임의의 지점에 대하여, 보정 식을 이용해 풍속을 예측 해볼 수 있다고는 하지만, 본 연구에서 사용한 수정지수모델은 지형이 아주 거칠거나 실측 높이와 보정 높이간의 차이가 아주 크게 되면 약간의 오차가 발생하는 모델로서 이를 주의해서 사용할 필요가 있다.

그러나 위의 보정식, 특히 식 (2.3)을 살펴보면,  $Z_0$ 에 대한 정의가 없음을 알 수 있다.  $Z_0$ 는 주변 지형의 거칠기 정도(roughness length,  $m$ )를 나타내는 주변 지형변화 요소를 나타내며, 실측된 주변의 지형을 충분히 고려하여 각 지형조건 변화에 따른  $Z_0$ 의 값을 활용하여 보정하게 된다.  $Z_0$ 의 값이 증가하면 주변 지형의 거칠음이 증가하는 것을 의미하고,  $Z_0$ 값이 감소하면 거칠음이 감소하는 것을 나타낸다.

이상과 같이 식 (2.1)~(2.4)를 이용해서, 15 m 높이에서 측정된 풍속 자료를 바탕으로, 30 m, 40 m, 45 m 높이에 대한 각각의 풍속을 구할 수 있었으며, Table 2.2에 보정된 한국해양대학교 내의 풍속 자료를 나타내었다.

Table 2.1 Roughness classes and roughness length

Roughness Class	Roughness Length, m	Landscape Type
0.321 ~ 0.92	0.001 ~ 0.02	Smooth (Sea level, Sand, Snow)
0.92 ~ 3	0.02 ~ 0.3	Rather rough (Grass, Suburbs)
3 ~ 4.5	0.3 ~ 2	Rough (Residential street)
4.5 ~ 6	2 ~ 10	Very rough (City)

Table 2.2 Distribution of wind velocity as a variation of height at Korea Maritime University

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
15 (m)	3.3	2.9	3.1	3.0	2.7	2.6	3.2	2.7	3.4	2.6	2.8	3.0
30 (m)	4.8	4.2	4.5	4.4	4.0	3.8	4.6	4.0	4.9	3.8	4.1	4.4
40 (m)	5.1	4.6	4.9	4.7	4.3	4.2	5.0	4.3	5.3	4.2	4.4	4.7
45 (m)	5.3	4.7	5.0	4.8	4.4	4.3	5.1	4.4	5.4	4.3	4.6	4.8

## 2-2 풍속분포

바람은 간헐적이며 시간에 따라 풍속이 바뀌는 가변적인 특성을 갖고 있기 때문에, 측정된 풍속자료를 이용하여 풍력발전시스템의 출력 등을 예측하기 위해서는 통계적 분석방법이 필요하다. 지역의 풍속분포를 나타내는 방법에는 Weibull 분포[Percival and Harper, 1982], Rayleigh 분포[Brode, et al., 1980], Beta 분포[Vankuiken, et al., 1980], Exponential 분포 등이 있으며, 이중에서 Rayleigh 분포와 Weibull 분포가 주로 이용되며, Rayleigh 분포에 비하여 Weibull 분포가 풍속분포를 나타내는 통계적 해석방법으로 적합한 것으로 알려져 있다.

Weibull 분포에서 확률밀도함수(probability density function),  $P(V)$ 를 나타내면 식 (2.5)와 같다.

$$P(V) = \frac{K}{C} \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad (2.5)$$

여기서  $C$ 는 scale parameter로 풍속의 평균값의 크기에 비례하는 상수이고,  $K$ 는 shape parameter로 편차의 크기를 나타내는 상수이다.

풍력발전용 터빈의 전기적 에너지 발전량을 계산할 수 있는 간단한 식은 식 (2.6)과 같다.

$$\begin{aligned} P_e &= C_P \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot P_W \\ &= \frac{1}{2} \rho A V^3 C_P \cdot \eta_m \cdot \eta_g \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기서,  $C_P$  : 동력계수  
 $\eta_m$  : 로터 블레이드의 회전력을 전달하는 동력장치  
 의 효율  
 $\eta_g$  : 발전기의 효율

식 (2.6)에서  $V^3$ 은 측정지역의 평균풍속이 아닌 순간풍속의 3승을 의미하므로 풍력발전시스템의 출력은 쉽게 구해질 수 없다. Weibull 분포의 확률밀도함수  $P(V)$ 를 이용하여  $\overline{V}$ 의 값을 구하면 식 (2.7)과 같다.

$$\begin{aligned}\overline{V} &= \int_0^{\infty} V \cdot P(V) \cdot dV \\ &= \int_0^{\infty} V \frac{K}{C} \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] dV \\ &= \int_0^{\infty} K \left(\frac{V}{C}\right)^K \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] dV\end{aligned}\quad (2.7)$$

위의 적분식을 풀기 위해서는 식 (2.8)과 같이 표현되는  $\Gamma$  함수를 이용한다.

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} x^{y-1} \exp[-x] dx \quad (2.8)$$

식 (2.7)식에서  $x = \left(\frac{V}{C}\right)^K$ , 그리고  $dx = \left(\frac{K}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{K-1}$ 으로 치



환해서 정리하면, 식 (2.9)와 같다.

$$\overline{V} = C \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{K}} \exp[-x^K] dx \quad (2.9)$$

$\Gamma$  함수를 이용해서 식 (2.9)를 정리하면 식 (2.10)과 같이 표현된다.

$$\overline{V} = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (2.10)$$

여기서  $K = 2$ 를 대입하여 식 (2.8)을 이용하여  $\Gamma$  함수 값을 구하면 다음과 같다.

$$\Gamma(1.5) = 0.8862$$

이 값을 식 (2.10)을 이용하여 정리하면,  $\overline{V} = C(0.8862)$ 이 되고, 이 분포를 Rayleigh 분포라 한다.

실제 측정한 풍속자료를 이용하여  $C$ ,  $K$  값을 구하기 위해서는 누적분포 함수(cumulative distribution function)  $F(V)$ 를 사용해야 하며,  $F(V)$ 는 식 (2.11)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F(V) &= \int_0^V P(V) dV \\ &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

식 (2.11)을 바꾸어 쓰면

$$1 - F(V) = \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad (2.12)$$

그리고 식 (2.12)에  $\ln$ 을 두 번 취하면,

$$\ln[\ln(1 - F(V))] = K \ln(V) - K \ln(C) \quad (2.13)$$

식 (2.13)은  $y = ax + b$  의 일차방정식 형태로 표현할 수 있다.

$y = \ln[\ln(1 - F(V))]$ ,  $a = K$ ,  $b = -K \ln(C)$ 으로 정의할 수 있으며  $b$ 를 정리하면  $C = e^{-b/K}$  가 된다. 이것을 MATLAB(ver. 6.1)을 사용해서 그래프로 표현하면  $y = 1.9x - 3.3$  ( $R^2 = 0.99$ )의 일차방정식이 됨을 알 수 있으며, Fig. 2.1에 그래프로 나타내었다.

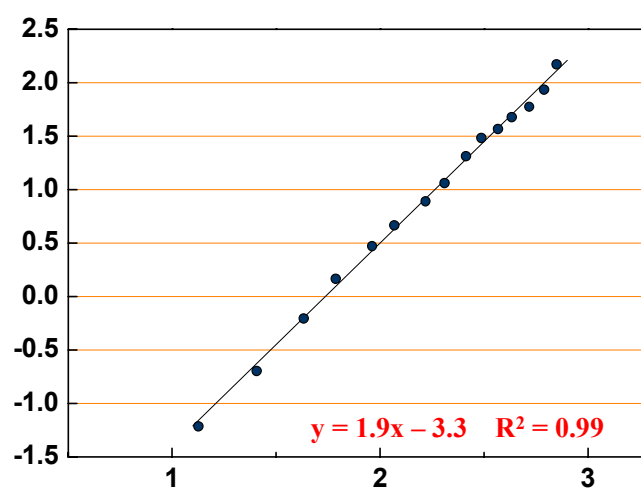


Fig. 2.1 Fitting to identify Weibull parameters

## 2.3 Weibull 분포의 적용

Weibull 분포를 이용하여 바람으로부터 얻을 수 있는 평균에너지량,  $P_{W \cdot ave}$ 는 식 (2.14)와 같다.

$$P_{W \cdot ave} = \frac{1}{2} \rho A \int_0^{\infty} V^3 P(V) dV \quad (2.14)$$

식 (2.10)을 이용하여 식 (2.14)를 다시 정리하면, 식 (2.15)가 되며,

$$P_{W \cdot ave} = \frac{1}{2} \rho A C^3 \Gamma(1 + \frac{3}{K}) \quad (2.15)$$

해당지역의  $C$ ,  $K$ 값을 알면 평균 에너지량을 구할 수 있다.

시동풍속  $V_C$ 와 정격풍속  $V_R$  그리고 변속장치 및 발전기 등의 효율을 고려하여 평균 전력 에너지 양,  $P_{e \cdot ave}$ 를 나타내면 식 (2.16)과 같다.

$$P_{e \cdot ave} = \frac{1}{2} \rho A \int_{V_C}^{V_R} C_P \eta_m \eta_g V^3 P(V) dV + \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{2} \rho A C_P \eta_m \eta_g V_R^3 \int_{V_R}^{\infty} P(V) dV$$

식 (2.16)의 첫 항에서  $C_P$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_g$  는  $V$ 에 따라 변하는 값이지만 시동풍속  $V_C$  이상에서 큰 변화가 없으므로, 적분식 밖으로 빼내서 정리할 수 있다. 따라서 식 (2.16)은 식 (2.17)과 같이 정리될 수 있다.

$$P_{e \cdot ave} = K_g(S_1 + S_2) \quad (2.17)$$

여기서  $K_g$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ 는 식 (2.18), (2.19), (2.20)과 같이 정리될 수 있다.

$$K_g = \frac{1}{2} \rho A C_P \eta_m \eta_g \quad (2.18)$$

$$S_1 = \int_{V_C}^{V_R} V^3 P(V) dV \quad (2.19)$$

$$S_2 = V_R^3 \int_{V_R}^{V_\infty} P(V) dV \quad (2.20)$$

식 (2.19)에서  $S_1$ 값은 정확히 구할 수 없으므로 수치적분을 사용하여 값을 얻기 위해 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$S_1 = KC^3 \int_{V_C/C}^{V_R/C} \left(\frac{V}{C}\right)^{K+2} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] d\left(\frac{V}{C}\right) \quad (2.21)$$

또한, 식 (2.20)에서  $S_2$ 의 값은 식 (2.22)와 같이 정확하게 구할 수 있다.

$$S_2 = C^3 \left( \frac{V_R}{C} \right)^3 \exp \left[ - \left( \frac{V_R}{C} \right)^K \right] \quad (2.22)$$

풍력에너지 계수,  $WF$ 는 식 (2.23)과 같이 정의된다.

$$WF = \frac{S_1 + S_2}{C^3} \quad (2.23)$$

$WF$ 를 결정짓는 주요 변수는 시동풍속  $V_C$ 와 정격풍속  $V_R$ 이다. 식 (2.23)를 이용하여  $WF$  값을 구하면,  $WF$  값이 최대가 되는  $V_R$  또는  $V_R/C$ 를 결정할 수 있다. 이때의  $V_R$ 은 해당지역에서 회전자의 단위면적 당 얻을 수 있는 최대 에너지 양을 나타내는 값이다.

Fig. 2.2는 시동풍속  $V_C=0.5 V_R$ 로 설계한 풍력발전시스템에서  $K$  값의 변화에 따른  $WF$ 와  $V_R/C$ 와의 관계를 나타낸 그림이다. 예를 들어 Fig. 2.2에서  $K=2.8$ 인 지역에 풍력발전시스템을 설치한다면, 회전자의 단위면적 당 얻을 수 있는 에너지는  $V_R/C=1.5$ 일 때 최대가 된다. 또한  $C \cong 1.12 \bar{V}$ 이므로 시스템의 정격풍속  $V_R$ 은 평균풍속,  $\bar{V}$ 의 약 1.68 배가된다.  $K$  값이 낮아질수록  $WF$ 는 값이 증가하고  $V_R/C$ 이 큰 곳에서 최대 값을 갖는다. 만일  $K=1.2$ 인 지역이라면  $WF$ 의 값은  $V_R/C=3.4$ 일 때 2.27로 최대가 된다. 이 때  $V_R$ 은 평균풍속의 약 3.8배가된다.

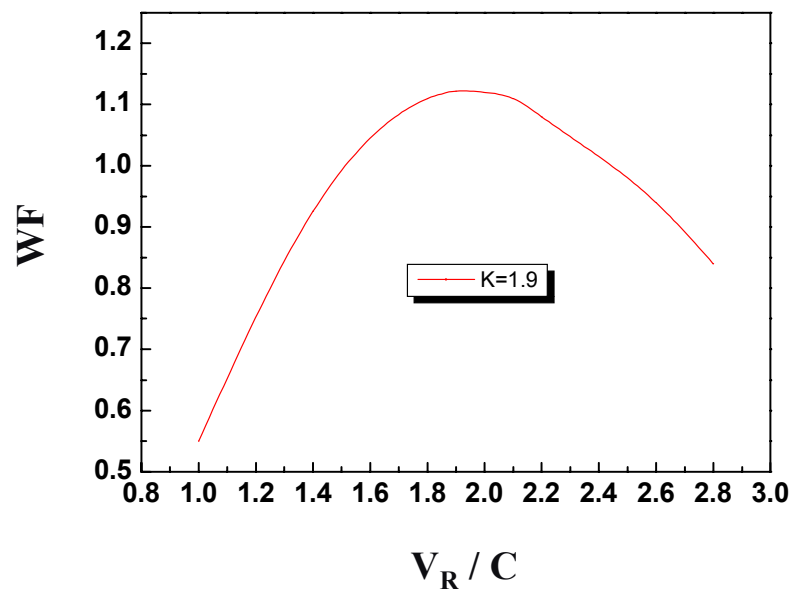


Fig. 2.2 Distribution of wind energy coefficient (WF)

풍력발전시스템을 설계하는데 있어서 다음과 같은 두가지 고려사항을 신중하게 검토 할 필요가 있다.

- ① 평균에너지량을 최대로 한다
- ② 부하측에 공급시 필요한 부하량의 산정

평균에너지량을 최대로 하기 위해서는 앞서 언급한 풍력에너지계수  $WF$ 를 고려해야 하며 부하 산정을 위해서는 식 (2.24)와 같이 정의되는 부하계수,  $LF$ 를 고려해야 한다.

$$LF = \frac{\text{평균에너지량}}{\text{정격출력}} = \frac{P_{e \cdot ave}}{P_{e \cdot rated}} = \frac{S_1 + S_2}{V_R^3} \quad (2.24)$$

여기서  $S_1$ 과  $S_2$ 는 식 (2.19)과 식 (2.20)에 정의되었다.

Fig. 2.3은  $V_C = 0.5 V_R$ 로 설계한 풍력발전시스템에서  $K$ 값의 변화에 따른  $LF$ 와  $V_R/C$ 와의 관계를 나타낸 그림이다.



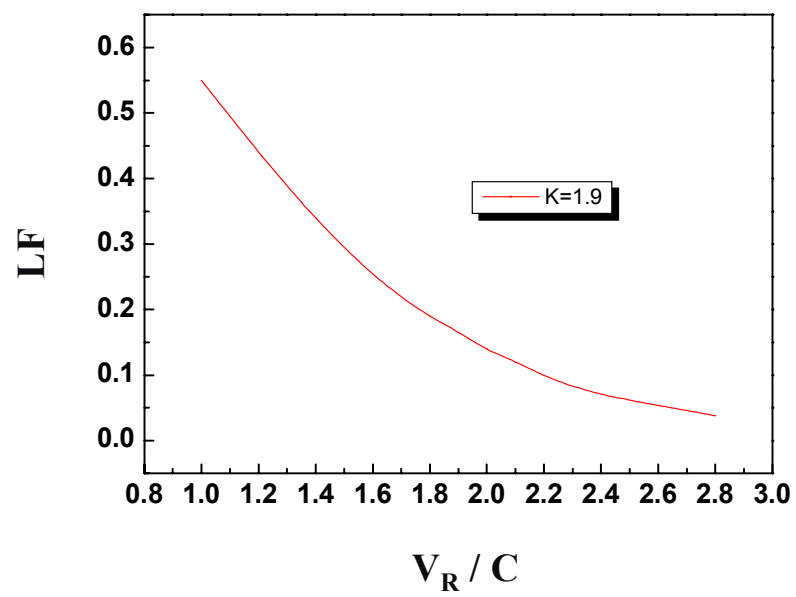


Fig. 2.3 Distribution of load coefficient (LF)

Fig. 2.3에서와 같이 정격풍속,  $V_R$ 이 증가하면 평균에너지량은 증가하지만 정격출력의 증가만큼 크지 못하기 때문에 부하계수  $LF$ 의 값은 감소하게 된다. 만일 풍력발전시스템이 기존 전력망에 연계되어 사용된다면 부하계수가 크게 중요한 변수는 아니다. 그러나 풍력발전 시스템에서 생산된 전력이 양수 등의 목적으로 사용된다면 부하계수는 매우 중요한 변수가 된다. 양수에 사용될 경우 정격출력은 부하에 의해 결정된다.

경제적인 풍력발전시스템 제작을 위해 연간 에너지 생산량을 최대 로 할 수 있도록 해야한다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해서는 그 지역의 기상조건에 맞는 풍력발전시스템을 설계하는 것이 필수적인 요소이다. Table. 2.2는 항 후, 한국해양대학교에 설치될 풍력발전 시스템의 설계 시 초기 설계변수로 필수적인, 정격풍속 및 부하계수 등을 나타낸 표이다.

Table. 2.3에서  $\overline{V}$ 은 평균풍속을 나타내며, 이는 앞서 언급한 Weibull 분포에서 구한 값이다.  $V_R/C$ 은  $LF$ 값이 최대일 때의 값이며,  $W$ 는 단위면적 당 얻을 수 있는 풍력발전시스템의 출력에서 일반적으로 적용되는 수치인  $C_P=0.4$ ,  $\eta_m=0.9$ ,  $\eta_g=0.9$ 로 하여 계산을 하였다. 이 값은 해당지역의 풍력 가용량을 나타낸다.

Table. 2.3 Wind characteristics of Korea Maritime Univ.

$\overline{V}$ ( $m/s$ )	$K$	$C$ ( $m/s$ )	$V_R$ ( $m/s$ )	$V_R/C$	$WF$ (max)	$LF$	$W/m^2$ (watt)
4.76	1.9	5.33	10.13	1.9	1.122	0.165	32.78

## 제 3 장 로터 블레이드 설계 및 이론적 성능 해석

### 3-1 로터 블레이드 설계

#### 3-1-1 로터 블레이드 날개 수와 성능

로터 블레이드 날개 수의 결정에 포함되는 중요변수는 설계 주속비(tip speed ratio, TSR), 제작단가, 로터 블레이드의 무게, 출력계수에 대한 효과, 구조 동역학, yaw rate의 제한 등을 들 수 있다. 날개 수가 성능에 미치는 영향은 Prandtle의 관계식을 확장한 식 (3.1)에 의하여 알 수 있다.

$$\begin{aligned}\eta_p &= \frac{C_p}{C_{p, ideal}} \\ &= \left(1 - \frac{0.93}{N\sqrt{\lambda^2 + 0.445}}\right)^2\end{aligned}\quad (3.1)$$

여기서,  $C_{p, ideal}$  : 0.593 (Betz law)

$\lambda$  : 설계 주속비 (TSR), 식 (3.3) 참조

$N$  : 블레이드 날개 수

식 (3.1)을 이용하여 각각의 설계 주속비에서의 블레이드 개수 변화에 따른 출력계수의 변화를 검토해본 결과, 날개 수가 1매에서 2매로 늘어날 때 출력계수의 변화는 약 10% 정도 높게 나타나고 있음을

알 수 있었으며, 날개 수가 3매로 늘어날 때까지 출력계수의 변화는 날개 수가 증가할수록 다소 급격한 변화를 보이고 있으나, 그 이상의 날개 수 출력계수변화는 거의 무시할 만한 수준의 작은 변화를 나타내고 있으므로, 현대식 풍력발전용 터빈의 로터 블레이드 날개 수는 보통 2~3매의 형태가 그 주류를 이루고 있다[13].

Table 3.1에 30kW급 이상, 현재 상용화 되고있는 풍력발전용 로터 블레이드의 날개 수 에 대한 각각의 비율을 나타내었다.

**Table 3.1 Blade numbers of commercial  
wind turbine designs**

Number of blades	% of designs
1	2
2	24
3	74

Fig. 3.1에 설계 주속비의 변화에 따른 동력계수의 변화를 각각의 블레이드 날개 수에 대하여 그래프로 나타내었다.

현대식 풍력발전용 터빈의 설계 주속비는 보통 7~10 정도이며, 3 블레이드 타입 로터 블레이드의 최고 동력계수를 나타내는 설계 주속비의 범위는 이와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 3 블레이드 타입의 풍력발전용 로터 블레이드는, 오늘날 대다수의 상용화된 풍력발전용 터빈의 표준이 되고 있으며, 이러한 형태의 디자인을 classical Danish 디자인이라 부른다[14].

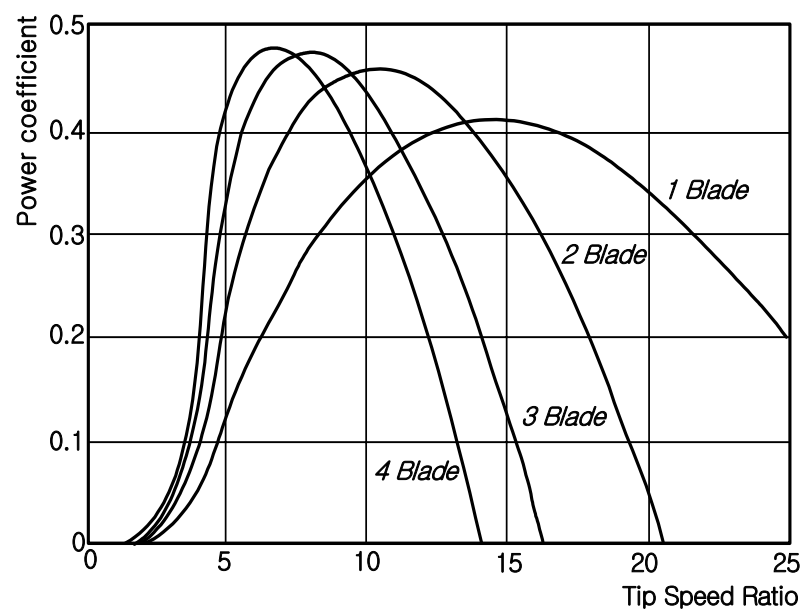


Fig. 3.1 Influence of the number of blades

### 3-1-2 날개의 단면 형상

풍력발전용 로터 블레이드 설계에 사용되는 익형은 대표적으로 NACA 시리즈, DU 시리즈, Riso A1 시리즈, NREL S 시리즈, FFA 시리즈 등이 있다. 이러한 풍력발전용 익형들의 특징은, 저 레이놀즈 수에서 높은 양항비(lift to drag ratio)를 확보 할 수 있고, 운전시 발생 가능성이 높은 익형의 표면 손상, 빗물, 먼지, 곤충 등이 익형의 전연부에 달라붙으면서 발생하는 공력 성능 감소율이 항공기 날개에 사용되는 익형에 비하여 비교적 낮다는 것이다. 로터 블레이드는 가능한 한 높은 출력특성을 확보하기 위해 형상 최적화의 일환으로 허브에서 팁 부분까지 일정한 비틀림 각을 가지고 비틀어져 있고, 선형적으로 단면의 두께가 변화하며, 테이퍼 지도록 설계된다[15]. 블레이드를 설계하는데 있어서 가장 우선되는 부분은 설계에 적합한 익형을 선정하는 것이다. 또한, 이러한 익형에 대하여 신뢰성 있는 양·항력 데이터를 반드시 확보하여야만 한다. 이러한 양·항력 데이터는 NACA 시리즈를 예로 들면, NASA 등에 의해 발표된 보고서를 통해 쉽게 확보 할 수 있으나, 최근 개발되고 있는 최신의 다양한 풍력발전용 익형의 공력특성 데이터를 일일이 확보하기란 여간 어려운 일 이 아니다. 실제 이런 익형의 공력특성 데이터는 풍동실험이나 고정도 수치 해석을 통하여 확보 할 수 있으며, 로터 블레이드 설계시 필수적인 실속 후 익형의 공력특성 데이터에 대하여, 다양하게 제시된 실속 후 모델을 적용한 후 이러한 공력특성 데이터 또한 쉽게 얻을 수 있다. 또한, 형상 정의를 위하여 익형의 2차원 단면 좌표 데이터가 필요하며, 이러한 데이터는 다양한 관련 문헌이나 웹사이트 등을



통해서 어렵지 않게 구할 수 있다.

### 3-1-3 로터 블레이드의 크기 선정

로터 블레이드를 설계하기 위한 블레이드 날개 수와 익형의 선정을 마쳤다면, 정격 출력(rated power)을 낼 수 있는 로터 블레이드의 회전 단면적의 크기를 결정해야 한다.

풍력발전 시스템의 성능을 결정하는 가장 핵심적인 요소는 로터 블레이드라고 할 수 있다. 풍력발전용 터빈의 로터 블레이드는 크게 수평축(horizontal axis), 수직축(vertical axis)으로 나눌 수 있는데, 그 형태에 따라 로터 블레이드의 효율이라 할 수 있는 동력계수( $C_p$ ) 값이 크게 달라지게 된다. 보통 프로펠러형 회전자가 높은 동력계수와, 넓은 운전 범위를 가지므로 가장 많이 사용된다. Table 3.2에서 보면, 프로펠러형 회전자의 최대동력계수( $C_{p_{max}}$ )는 0.48 정도로서 다른 종류에 비해 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 단 최대 동력 계수는 Betz 이론에 의해 0.593을 넘을 수 없다.

식 (3.2)를 이용하여 로터 블레이드의 회전 단면적을 결정 할 수 있다.

$$D = \sqrt{\frac{8 \times P_R}{\eta \times C_{p_{max}} \times \rho \times \pi \times V_R^3}} \quad (\text{m}) \quad (3.2)$$

여기서,  $P_R$  : 정격출력 (W)

$\eta$	:	동력전달장치의 효율 $\times$ 발전기의 효율
$Cp$	:	동력계수
$\rho$	:	밀도 ( $kg/m^3$ )
$V_R$	:	정격풍속 ( $m/s$ )

식 (3-2)를 살펴보면, 설계하고자 하는 풍력발전용 터빈의 정격 출력용량이 결정되고, 설치 지역에서의 밀도, 설계 동력계수와 동력전달장치와 발전기의 효율, 설치될 지역의 풍황자원 데이터를 바탕으로 그 지역에서의 정격 풍속을 결정 할 수 있다면 로터 블레이드의 회전 단면적을 결정 할 수 있다. 정격 풍속을 선정함에 있어서 정격 풍속이 높으면 시스템 가동률이 현저히 낮아지고, 정격 풍속이 낮으면 회전자의 크기가 커져야 하므로 신중하게 결정 할 필요가 있다. 보통 풍력발전 터빈의 시동 풍속( $V_c$ )은 정격풍속의 1/2 이므로, 정격풍속이 10인 경우 시동풍속은 5m/s 가 된다.

정격풍속이 정해지고 회전자의 크기가 구해지면 다음단계로 회전자의 설계 주속비  $\lambda$  를 구해야 한다. 설계 주속비의 정의는 식 (3.3) 과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_R} \quad (3.3)$$

여기서,  $R$  : 로터 블레이드의 반경방향 길이 (m)  
 $\Omega$  : 정격 회전수 (rps)

식 (3.3)을 이용하여 정격 풍속에서 정격회전속도로 회전하는 반경  $R$  인 로터 블레이드의 설계 주속비를 구할 수 있다.

Table 3.2 Maximum power coefficient of rotor blade

Wind turbine type		Max power coeff. ( $C_{P_{\max}}$ )	Tip Speed Ratio (TSR)
Horizontal Axis	Multi bladed	0.32	0.75
	Propeller type (HAWT)	0.48	5~11
Vertical Axis	Sabonius	0.22	0.8
	Darius	0.35	5~11

### 3-1-4 형상설계

앞선 과정으로부터 회전자의 직경, 정격속도, 설계 주속비를 구할 수 있었다면, 다음으로 회전자의 형상을 설계하여야 한다. 먼저, 블레이드 반경방향으로 일정한 간격을 두고 허브 비에 상당하는(블레이드 반경의 통상 15 % 정도임) 부분을 제외한 나머지 부분에 대하여 각각 일정한 간격을 두고 분할한다.

이미 설계 주속비는 식 (3.3)을 통하여 구할 수 있었지만, 블레이드의 반경방향으로 임의의 국소 위치에서의 국부 주속비 ( $\lambda$ )는 반경방향으로 일정한 간격을 두고 분할된 위치가 모두 다르기 때문에 차이가 난다. 식 (3.4)에 따라 균등 분할 된 블레이드 각각의 위치에서 국부 주속비를 구할 수 있다.

$$\lambda_{local} = \lambda \frac{r}{R} \quad (3.4)$$

Altman에 의해 제시된 국부 속도비와 익형의 받음 각  $\alpha$ 와의 관계를 나타낸 식 (3-5)에 따라, 일정한 간격을 두고 분할 된 각 위치에서 익형의 받음각을 계산 할 수 있으며, 따라서, 각각의 위치에서의 비틀림 각을 알 수 있다.

$$\lambda = \frac{\sin \alpha (2 \cos \alpha - 1)}{(1 + 2 \cos \alpha)(1 - \cos \alpha)} \quad (3.5)$$

여기서,  $\alpha$  : 받음각 (angle of attack)

이제 로터 블레이드의 각 위치별로 정해진 받음 각  $\alpha$ 와 날개개수, 익형의 받음 각에 대한 양력 계수 ( $C_L$ )의 관계에 의해 각 위치별 시위/위치 ( $c/r$ )의 값은 식 (3.6)으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{c}{r} = 8\pi \frac{(1 - \cos \alpha)}{N \times C_L} \quad (3.6)$$

여기서,  $c$  : 익형 시위길이  
 $r$  : 블레이드 반경방향 임의의 국부 위치  
 $N$  : 날개 수  
 $C_L$  : 양력계수

따라서, 위의 관계를 이용하여 블레이드 반경 방향으로 균등 분할된 임의의 국부 위치에서의 익형 시위 길이  $c$ 를 결정 할 수 있으며, 기본적인 로터 블레이드의 형상설계를 할 수 있다.

## 3-2 이론적 성능해석

### 3-2-1 Momentum 이론

운동량 이론은 Rankin-Froude 에 의해 개발·발전된 이론이며, 이를 이용하여 독일의 Betz는 이상적인 로터 블레이드의 효율을 계산할 수 있었다. 운동량 이론을 적용하기 위해서는 우선 다음과 같은 가정을 하여야만 한다.

- ① 로터 블레이드의 날개 수는 무한하다.
- ② 로터 블레이드의 회전 단면상의 공기흐름은 균일하다.
- ③ 로터 블레이드의 마찰력에 의한 저항력은 없다.

위의 가정을 통해서 운동량 이론은 실제 풍력발전용 터빈의 로터 블레이드 효율을 정확하게 반영하여 나타낼 수 없음을 알 수 있으나, 이상적인 조건에서의 효율과 유속을 예측하는데 유용하게 사용되는 이론이다.

### 3-2-2 Actuator Disc 이론

Fig. 3.2에서 로터 블레이드의 회전단면을 통과하는 기류의 흐름을 비 압축성이라고 가정하면 식 (3.7)과 같은 연속 방정식을 만족한다.

$$V_{\infty} \cdot A_{\infty} = V_R \cdot A_W \quad (3.7)$$

베르누이 방정식에 따라 로터 블레이드 전·후의 압력차  $\Delta P$ 는 식 (3.8)과 같이 구할 수 있다.

$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 = H = Const \quad (3.8)$$

로터 블레이드로의 입력을  $H_1$ 이라 하면, 로터 회전면 ㉠ 단면에서의 성분과 동일하다고 생각할 수 있으며, 식 (3.9)와 같다.

$$H_1 = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 = P_r + \frac{1}{2} \rho V_r^2 \quad (3.9)$$

로터 블레이드로부터 빠져나가는 성분을  $H_2$ 라 하면, ㉡ 단면에서의 성분은 회전면으로부터 멀리 떨어져 있는 위치에서의 성분과 동일하다고 생각할 수 있으며, 식 (3.10)과 같다.

$$H_2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_W^2 = P_r - \Delta P + \frac{1}{2} \rho V_r^2 \quad (3.10)$$

식 (3.10)에서,  $\Delta P$ 는 로터 블레이드의 회전면을 통과 할 때 발생하는 압력 손실이다.

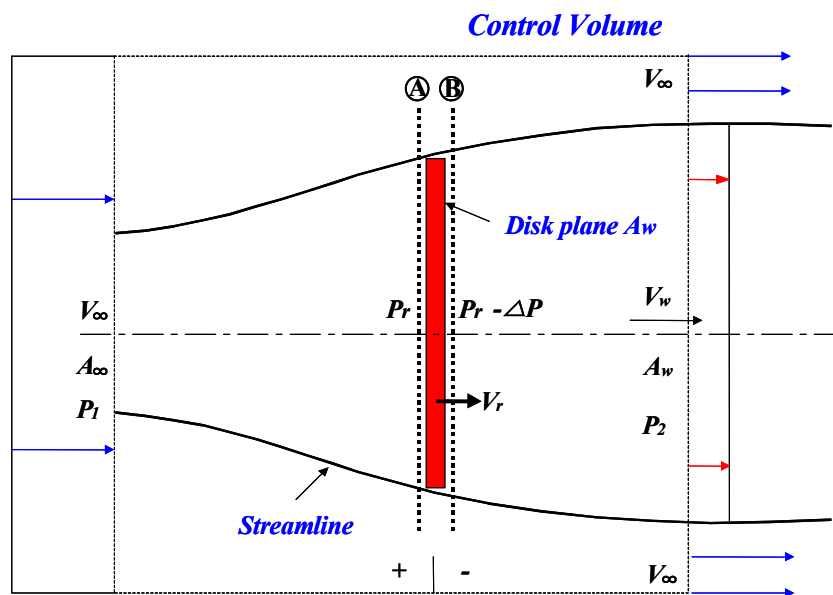


Fig. 3.2 Idealized flow through an actuator disk



로터 블레이드의 회전면에 대한 영향을 받지 않는 위치에서의 압력  $P_1 \doteq P_2 \doteq P_a$ (대기압)이므로, 회전면의 전·후에서 발생하는 압력 차는 식 (3.11)과 같다.

$$\Delta P = H_1 - H_2 = \frac{1}{2} \rho (V_\infty^2 - V_w^2) \quad (3.11)$$

따라서, 회전단면 전·후의 압력 차  $\Delta P$ 에 의해 로터 블레이드에 작용하는 힘  $F_1$ 은 식 (3.12)와 같이 구할 수 있다.

$$F_1 = \Delta P \cdot A \quad (3.12)$$

또한, Newton의 제 2법칙에 의해 로터 블레이드에 작용하는 힘은 식 (3.13)과 같이 기술할 수 있다.

$$F_2 = m(V_\infty - V_w) \quad (3.13)$$

여기서,  $m$ 은 질량유량을 나타낸다. ( $m = \rho \cdot V_r \cdot A$ )

식 (3.12)와 (3.13)의 힘  $F_1$ 과  $F_2$ 는 회전단면에 작용하는 공기역학적인 항력으로 생각할 수 있다. 따라서  $F_1 = F_2$ 이므로, 식 (3.14)와 같이 정리 할 수 있다.

$$\Delta P \cdot A = m(V_{\infty} - V_w) = \rho V_r A (V_{\infty} - V_w)$$

$$\therefore V_r = \frac{1}{2} (V_{\infty} + V_w) \quad (3.14)$$

$V_{\infty}$  는 로터 블레이드 회전단면 전방의 풍속이므로 측정이 가능 하지만,  $V_w$  는 로터 블레이드의 후방 풍속으로써 로터 블레이드의 회전 상태, 즉 날개의 속도 비에 따라 변하는 값이며, 그 크기를 직접 구할 수는 없다.

상류에서 불어오는 바람이 로터 블레이드의 회전면을 통과 할 때 발생하는 풍속 감소율을 축 간섭계수  $a$  라고 하며 식 (3.15)와 같이 정의한다.

$$a = \frac{V_{\infty} - V_r}{V_{\infty}} \quad (3.15)$$

식 (3.14)와 (3.15)를 이용하여  $V_r$  과  $V_w$  를 구하면 식 (3.16), (3.17)과 같다.

$$V_w = V_{\infty} (1 - 2a) \quad (3.16)$$

$$V_r = V_{\infty} (1 - a) \quad (3.17)$$

출력  $P_w$ 는 단위시간당 운동에너지의 변화량으로써 식 (3.13),

(3.16), (3.17)을 이용해서 풀면 식 (3.18)과 같이 표현 할 수 있다.

$$P_W = 2\rho V_\infty^3 A a(1-a)^2 \quad (3.18)$$

여기서,  $\rho$ ,  $V_\infty$ ,  $A$ 의 값들이 일정한 상수라고 가정하면, 출력  $P_W$ 는 축 간섭계수  $a$ 만의 함수이다. 따라서  $\frac{dP_W}{da} = 0$ 인 지점에서 출력의 최대 값을 가지게 되며, 이를 만족하는 축 간섭계수  $a$ 의 값은 1, 1/3 이다. 하지만, 축 간섭계수가 1이라는 것은 물리적으로 의미가 없으므로,  $a = \frac{1}{3}$ 인 지점에서 출력은 최대가 되며, 최대 출력  $P_{W \text{ Max}}$ 는 식 (3.19)와 같이 표현된다.

$$P_{W \text{ Max}} = \frac{8}{27} \rho V_\infty^3 A \quad (3.19)$$

따라서, 최대 출력계수  $C_{P \text{ Max}}$ 는 식 (3.20)과 같다.

$$C_{P \text{ MAX}} = \frac{P_{W \text{ Max}}}{1/2 \rho V_\infty^3 A} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (3.20)$$

즉, 풍차에서 이론적으로 얻을 수 있는 이상적 최대 동력에너지는 바람이 가지는 에너지의 59.3% 이상이 될 수 없다라는 것을 보여준다. 이는 이상적인 수치이며, 실제 풍력발전용 터빈의 동력계수는 59.3% 이하이며, 최근에 상용화되고 있는 중·대형 풍력발전용 터빈의

동력계수는 약 45% 정도의 수준이다.

### 3-2-3 Annular Momentum 이론

Betz는 Rankin-Froude의 운동량이론을 적용하여 이상적인 풍차의 효율을 계산하였으나, 이는 풍차 후방의 미끄럼 흐름(slip stream)을 고려하지 않은 축 운동량이론만을 이용하였으며, 로터 블레이드 전 회전면에 대하여 축 간섭계수  $a$ 가 일정하다고 가정하였다. 하지만, 실제 로터 블레이드에서는 반경방향에 따라 흐름이 변화하게 되므로, 위와 같은 방법으로 간단히 성능을 예측할 수 없다. Fig. 3.2와 같이 로터 블레이드가 반경방향으로 미소 원형관( $2\pi r dr$ )으로 이루어진 서로 독립적인 미소 요소들에 의하여 구성된다고 가정한다.

풍차가 회전할 때 회전익의 각속도를  $\Omega$ 라고 하고, 풍차 후류의 미끄럼 흐름의 각속도를  $\omega$ 라하면, 회전익의 각속도에 대한 회전면을 통과하는 바람의 각속도의 비로 정의되는 회전간섭계수(angular interference factor)  $a'$ 은 식 (3.21)과 같이 정의된다.

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (3.21)$$

Fig. 3.2와 같이 미소추력  $dT_m$ 과 미소토크  $dQ_m$ 은 식 (3.22), (3.23)과 같다.

$$dT_m = dm(V_\infty - V_W) \quad (3.22)$$

$$dQ_m = dm\omega r^2 \quad (3.23)$$

식 (3.15), (3.16), (3.17), (3.21)을 이용해서 식 (3.22), (3.23)을 다시 표현하면 식 (3.24), (3.25)와 같다.

$$dT_m = 4\rho\pi r V_\infty^2 a(1-a) dr \quad (3.24)$$

$$dQ_m = 4\rho\pi r^3 V_\infty a'(1-a) \Omega dr \quad (3.25)$$

임의의 미소 원형요소에 대하여 허브로부터 팁까지 적분하면 식 (3.26)을 이용하여 실제 출력을 구할 수 있다.

$$P = \int \Omega dQ = \int 4\pi r^3 \rho V_0 a'(1-a) \Omega^2 dr \quad (3.26)$$

설계 주속비( $\lambda = \frac{R\Omega}{V_\infty}$ )와 국부 주속비( $\lambda_{local} = \frac{r\Omega}{V_\infty}$ )의 관계로

부터,  $dr = \frac{V_\infty}{\Omega} d\lambda_{local}$ ,  $\frac{V_\infty}{\Omega} = \frac{R}{\lambda}$  이므로, 출력  $P$ 는 식 (3.27)과 같이 표현될 수 있다.

$$P = \int_{\lambda_h}^{\lambda} 4\pi \rho V_\infty^5 a' \frac{\lambda_{local}^3}{\Omega^2} (1-a) d\lambda_{local}$$

$$= \frac{4\pi\rho V_\infty^3 R^2}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} a'(1-a) \lambda_{local}^3 d\lambda_{local} \quad (3.27)$$

따라서, 출력계수  $C_p$ 는 식 (3.28)과 같이 표현될 수 있다.

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} a'(1-a) \lambda_{local}^3 d\lambda_{local} \quad (3.28)$$

### 3-2-4 Blade Element Momentum 이론

날개요소이론은 Froude에 의해 시작되어 Drzewiecki에 의해 개발되었다. 운동량이론의 단점은 블레이드 단면 변화를 반영하지 않고, 로터 블레이드 전체를 해석하는 방법이므로, 실제 블레이드의 단면변화에 따른 풍차의 출력특성을 예측 할 수 없다. 따라서, 블레이드 국부위치에서의 2차원 익형 단면의 공력특성인 양력과 항력을 바탕으로, 익형 단면의 변화 등에 능동적으로 대처 할 수 있으면서 전체적인 풍력터빈의 성능을 비교적 정확하게 예측 할 수 있는 BEM 법이 풍력터빈의 성능을 평가하는데 있어 매우 유용한 도구로 널리 적용되고 있다. Fig. 3.3은 회전하는 블레이드 임의의 위치에서의 2차원 익형 단면에서 발생하는 공기력과 공기력선도를 나타낸다. 익형의 전연으로 유입되는 상대속도  $W$ 에 대하여 수직성분의 힘 양력  $L$ 과 수평성분의 힘 항력  $D$ 는 식 (3.29), (3.30), (3.31)과 같이 정의된다.

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho W^2 S \quad (3.29)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho W^2 S \quad (3.30)$$

$$W = \sqrt{[V_\infty(1 - a)]^2 + [r\Omega(1 + a')]^2} \quad (3.31)$$

미소추력  $C_n$ 과 미소토크  $C_t$ 는 식 (3.32), (3.33)과 같이 정의된다.

$$C_n = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (3.32)$$

$$C_t = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (3.33)$$

따라서, 미소 날개요소에서 발생하는 추력과 토크는 식(3.34), (3.35)와 같이 표현될 수 있다.

$$dT_m = NC \frac{1}{2} \rho W_2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad (3.34)$$

$$dQ_m = NC \frac{1}{2} \rho W_2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr \quad (3.35)$$

여기서 N은 날개 수, C는 날개 현의 길이,  $\Psi$ 는 블레이드의 회전면과 유입상대속도 W가 이루는 각도이며  $\Psi$ 는 식 (3.36)과 같이 정의

된다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_{\infty}(1-a)}{r\Omega(1+a')} \quad (3.36)$$

받음각  $\alpha$ 는 식 (3.37)과 같이 정의된다.

$$\alpha = \phi - \theta \quad (3.37)$$

### 3-2-5 Strip 이론

풍력터빈에서 발생하는 추력은 로터 블레이드 전·후방의 축 운동량 변화에 기인하며, 이러한 축 운동량의 변화는 로터 블레이드의 날개요소에서 발생하는 공기력 중 축 방향의 힘에 의한 것이므로 로터 블레이드의 반경방향으로 구분된 가상의 미소 원형요소에서 발생하는 추력은 운동량이론과 날개요소이론에서 구한 결과가 동일해야만 한다.

미소추력은 식 (3.38)과 같이 정의된다.

$$dT_m = dT_b \quad (3.38)$$

축 간섭계수  $a$ 는 식 (3.39)에 의하여 구할 수 있다.



$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_L(C_L \cos\phi + C_D \sin\phi)}{8 \sin^2\phi} \quad (3.39)$$

$\sigma_L$ 은 국소회전 면적비로써 식 (3.40)과 같이 정의된다.

$$\sigma_L = \frac{NC}{\pi r} \quad (3.40)$$

마찬가지로 미소 토오크  $dQ_m$ 은 식 (3.41)에 의해 구할 수 있다.

$$dQ_m = dQ_b \quad (3.41)$$

회전간섭계수  $a'$ 는 식 (3.42)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_L(C_L \sin\phi - C_D \cos\phi)}{8 \sin\phi \cos\phi} \quad (3.42)$$

새로이 구해진 축 간섭계수  $a$ 와 회전간섭계수  $a'$ 를 통해 풍력발전용 터빈의 출력은 식 (3.43)을 통해 예측할 수 있다.

$$P = \frac{4\pi\rho V_\infty^3 R^2}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} a'(1-a) \lambda_{local}^3 d\lambda_{local} \quad (3.43)$$

출력계수는 식 (3.44)와 같다.

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} a' (1 - a) \lambda_{local}^3 d\lambda_{local} \quad (3.44)$$

풍력터빈의 성능은 설계 파라미터로 정해진 날개 수  $N$ , 코드길이  $C$ , 반경  $R$ , 양력  $C_L(\alpha)$ , 항력  $C_D(\alpha)$ , 비틀림 각  $\theta$  그리고 입구 속도에 대하여 설계 주속비  $\lambda$ 에 대하여 변화한다. 하지만 위에서 제시된 식 (3.43)과 (3.44)는 풍차날개의 임의의 미소 반경에 대하여 흐름 방향을 2차원으로 가정했기 때문에 반드시 수정이 필요하게 된다. 실제로 3차원적인 항공기 날개에서는 날개 상면과 하면의 압력차에 의해 날개 끝에서 와류가 발생하게 된다. 이러한 날개 끝 와류(tip vortex)에 의한 영향으로 날개 주위의 순환분포가 감소되므로 날개 끝 부분에서부터 손실이 발생하게 되며, 이러한 현상을 날개 끝 손실 (tip loss)이라 하고, 실제 풍력터빈 블레이드에서도 동일하게 발생하는 현상이다. 이러한 날개 끝 손실을 고려한 계산기법 중 실제 블레이드 길이의 약 97%만을 고려하여 계산하는 “유효 반경법”이 있다. Prandtl과 Goldstein은 프로펠러의 날개 끝 손실에 대한 연구를 통해, 날개 끝에서의 순환감소모델을 개발하였으며, Prandtl의 날개 끝 손실 계수는 식 (3.45)와 같이 표현된다.

$$F_t = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f} \quad (3.45)$$

여기서,

$$f = \frac{N}{2} \frac{R-r}{R \sin \phi} \quad (3.46)$$

이 날개 끝 손실계수를 이용하여 새로운 축 간섭계수와 회전간섭계수를 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_L(C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)}{8 F_t \sin^2 \phi} \quad (3.47)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_L(C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{8 F_t \sin \phi \cos \phi} \quad (3.48)$$

Prandtl의 보정계수를 이용하여 새로이 구해진 축 간섭계수와 회전간섭계수를 식 (3.43)과 식 (3.44)에 적용하여 날개 끝 손실까지 고려한 풍력터빈의 성능을 보다 정확하게 예측 할 수 있다.

### 3-3 실속 후 익형 공력특성 예측

풍력발전용 로터 블레이드를 설계하는 과정에서 로터 블레이드의 미소 단면 형상은 모두 2차원 익형으로 이루어져 있으므로, 정확한 익형의 공력특성 데이터를 확보하는 것이 필수적이다. 항공기의 설계시 익형은 항공기 기체의 안정성 등의 문제로 인하여 급격한 양력의 감소를 초래하는 실속(stall) 현상을 방지하도록 설계하는 것이 일반적인 방법이다. 하지만, 풍력발전용 로터 블레이드를 설계하는데 있

어서 실속현상은 풍력 발전용 터빈의 출력을 제어하는 하나의 수단으로써 사용되어지므로, 실속에 대한 충분한 연구가 이루어져야 하며, 특히 정확한 미소 토크 와 미소 추력을 계산하기 위해서는 익형의 실속 후 공력특성에 대한 신뢰성 있는 데이터를 필요로 한다. 하지만 불행히도 대다수의 실험데이터는 항공기의 설계에 초점이 맞추어져 있으므로 실속 후 익형의 공력특성에 대한 데이터를 제시하는 경우는 극히 드물다. 따라서 이러한 실속영역에서의 양·항력을 정확하게 예측하기 위한 보정 식이 필요하며, Viterna-Corrigan에 의해 제시된 다음과 같은 실속 후 공력특성 예측 방법을 이용하여 보정한 다.

실속 후 항력계수는 다음과 같다.

$$C_D = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha \quad (3.49)$$

$$B_1 = C_{DMax}$$

$$C_{DMax} = 1.11 + 0.018AR \quad (3.50)$$

$$AR(Aspect Ratio) = \frac{c}{R} \quad (3.51)$$

$$B_2 = \frac{1}{\cos \alpha_s (C_{Ds} - C_{DMax} \sin^2 \alpha_s)} \quad (3.52)$$

$\alpha_s$ 는 실속이 일어나는 받음각을 나타내며,  $C_{Ds}$ 는 실속이 발생하는 받음 각에서의 항력계수를 나타낸다.

실속 후 양력계수는 식 (3.53)과 같다.

$$C_L = A_1 \sin^2 \alpha + A_2 \cos^2 \alpha / \sin \alpha \quad (3.53)$$

여기서,

$$A_1 = \frac{B_1}{2} \quad (3.54)$$

$$A_2 = (C_{Ls} - C_{DMax} \sin \alpha_s \cos \alpha_s) \left( \frac{\sin \alpha_s}{\cos^2 \alpha_s} \right) \quad (3.55)$$

윗 식을 이용하여 실속 후 익형의 공력특성을 비교적 정확하게 예측 할 수 있다.

### 3-4 로터 블레이드 형상 최적화

이상과 같은 설계과정을 거친 블레이드는 각 단면에서 익형의 공력특성을 바탕으로 최고 출력을 낼 수 있도록 형상 최적화 과정을 거친다. 출력계수가 최대 값을 가지기 위해선 식 (3.28)에서

$$\left( \frac{\partial C_p}{\partial a} \right) = 0 \text{ 가 되는 조건을 만족하는 다음의 방정식을 이용하여}$$

새로운 축 간섭 계수를 계산한다.

$$\left(\frac{r}{\lambda R}\right)(1-a)(1-3a) - \left(\frac{C_D}{C_L}\right)(1-2a)\left(-\frac{\lambda_{local}^2 + 2a(1-a)}{\lambda^2}\right) = 0 \quad (3.56)$$

식 (1.48)의 조건을 만족하는 축 간섭계수  $a$ 를 구한 뒤, 식 (3.57)을 이용하여 회전간섭계수  $a'$ 을 구한다.

$$a' = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4a(1-a)}{\left(r \frac{\lambda}{R}\right)^2}} \right) \quad (3.57)$$

새로이 계산된 축 간섭계수와 회전간섭계수는 식 (3.36)을 이용하여 블레이드의 회전면과 유입상대속도가 이루는 각  $\phi$ 를 계산할 수 있다. 계산된  $\Psi$ 값과 각 익형 단면에서 양향비가 최대가 되는 지점에서의 받음각을 이용하여, 식 (3.37)에 따라 각각의 단면에서 최적 피치각  $\theta$ 를 구할 수 있다.

## 제 4 장 Gurney flap을 장착한 익형의 공력특성

앞장에서 설명한바와 같이 풍력발전용 터빈의 로터 블레이드를 설계하고 그 성능을 평가하는데 있어서, 신뢰성 있는 2차원 익형 공력 특성 데이터를 충분히 확보하여야만 한다. 대부분 이러한 자료들은 풍동실험 등에 의하여 얻어질 수 있으나, 실제 로터 블레이드를 설계하는 엔지니어의 입장에서 그러한 실험을 일일이 수행하기란 여간 힘든 일이 아닐 수 없다. 이러한 풍력발전용 로터 블레이드를 설계하는 엔지니어들은, 다양한 분야에 적용되어 이미 그 신뢰성이 검증된 상용 CFD(computational fluid dynamics) 코드들을 이용하여 설계에 필요한 데이터를 얻고 있는 것이 현재의 추세이다. CFD의 가장 큰 장점은 원하는 형상에 대한 수치적 데이터를 자유롭게 신속하게 얻을 수 있고, 실험결과에 거의 근접한 수준의 신뢰성 있는 데이터 또한 제공 할 수 있다는 점이다. 이는 조건이 바뀔 때마다 매번 실험을 거쳐 새로운 데이터를 얻어야만 하는 방법에 비하여, 설계자의 입장에서는 상당히 효율적이며, 수많은 케이스에 대한 검토를 짧은 시간에 가능하게 해주는 상당히 효율적이며 매력적인 부분이다.

익형의 성능을 나타내는 가장 핵심적인 변수는 양력과 항력이라고 할 수 있다. 양력이란, 익형의 전연으로 불어들어오는 바람의 방향에 수직으로 작용하는 힘의 성분이며, 로터 블레이드의 회전에 직접적으로 작용하는 가장 핵심적인 요소이다. 반면, 항력은 익형의 전연으로 불어 들어오는 바람의 방향에 대해 평행한 방향으로의 힘의 성분이라 정의 내릴 수 있고, 간단하게 말해서, 로터 블레이드의 회전을 방해하는 성분의 힘이라고 생각 할 수 있다[16]. 따라서, 익형의 양력

값은 높을수록 좋고 항력 값은 낮을수록 좋다. 양항비는 익형의 양력 값과 항력 값의 비로 정의된다. 보통 우수한 익형이라고 함은 이러한 양항비가 높은 익형을 말하며, 높은 양항비를 얻기 위하여 항력 감소 및 양력 증가를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

익형의 양력을 높이기 위한 방법으로, 익형 후연 끝단에 다양한 형태의 플랩을 장착하는 방법을 사용하며, 이는 실제 항공산업에서 이미 오래 전부터 적용되고 있는 방법이다. 또한, 익형의 양력감소 및 항력증가에 가장 큰 영향을 미치는, 받음각의 증가로 인한 익형 전연으로 부터 발생하는 박리 현상의 발생을 억제하기 위하여 전연부에 vortex generator를 설치하여, 강제로 난류 경계층을 형성시켜 양력의 손실을 억제하는 방법을 사용하기도 한다[17].

풍력 발전용 터빈의 로터 블레이드를 설계하는데 있어서 또 하나의 중요한 고려사항은 경제성이다. 실제 다양한 플랩을 블레이드 후연 끝단에 설치하여 보다 우수한 성능을 얻을 수 있게된다 할지라도, 그 구조가 기계적으로 상당히 복잡하여 제작비용 상승을 초래한다면 그 의미가 없다. 따라서, 기계적 구조가 간단하고 쉽게 제작 할 수 있는 고 양력 장치에 대한 연구가 필요하며, Gurney flap은 이러한 조건에 대해 비교적 만족스러운 장치라 할 수 있다. Gurney flap을 장착한 익형의 공력성능 변화에 대한 연구로써 Kentfield 등[3]에 의하여 1994년에 Gurney flap을 장착한 풍력터빈 블레이드의 양항비 상승에 관한 이론적, 실험적 연구가 수행되었고, 1997년에는 Guy 등 [4]에 의하여 양항비 상승을 위한 최적 Gurney flap의 크기에 관한 연구가 수행되었다. 따라서, 본 연구에서는 풍력발전용 로터 블레이드의 성능을 향상시키기 위한 방법으로 2차원 익형의 끝단에 Gurney flap을 장착할 때 와 장착하지 않을 때의 양 항력 변화에 대하여, 상



용 CFD 코드인 FLUENT를 이용하여 다양한 수치해석적 연구를 수행한 후, 풍력발전용 터빈 로터 블레이드를 설계하는데 필수적인 요소인 익형의 공력성능 해석에 대한 상용 CFD의 적용가능성을 제시하는데 목적을 둔다.

#### 4-1 Gurney flap

Gurney flap은 익형의 후연 아랫면에 90°각도로 부착되어 익형의 공력특성 향상에 기여하는 장치이다. 보통 이러한 고양력 장치는 항공 산업에서 항공기의 이·착륙시 활주거리를 짧게 하기 위하여 사용되나[18], 풍력발전에서는 풍황자원이 충분하지 못한 지역에 대하여, 고효율의 로터 블레이드 설계시 이용된다.

보통 플랩의 크기가 코드길이(chord length)의 2%를 넘을 경우 양력의 증가범위보다 항력의 증가 범위가 더욱 커지게 되어, 익형 공력특성 지표인 양항비가 나빠지게 되므로, 플랩의 크기(height)는 통상적으로 익형 코드길이의 0.5~2%가 적절하다고 알려져 있다.

Fig. 4.1에 Gurney flap의 형상과 익형에 장착된 모습을 그림으로 나타내었다.

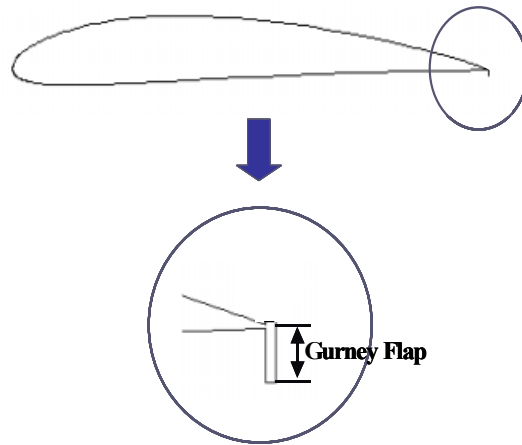


Fig. 4.1 Gurney flap

## 4-2 익형의 형상정의 및 계산조건

### 4-2-1 익형의 형상정의

본 연구에 사용된 익형은 NACA 63<sub>2</sub>-215이며, 풍력발전용 터빈의 로터 블레이드 제작시 주로 사용되는 익형 중의 하나이다. NACA 6자리 계열 익형의 특징은 층류 익형으로써, 근사 식을 사용하여 설계양력계수에서 최소의 항력을 나타내도록 설계되었다.

NACA 6자리 계열의 표기법은 NACA 63<sub>2</sub>-215와 같이 표현 할 수 있다. 여기서 첫째자리 숫자는 계열번호를, 두 번째 숫자는 익형표면에서 최대속도 즉, 압력이 가장 낮은 지점의 위치를 표시하며, 세 번째 숫자는 최소 항력계수, 네 번째 숫자는 설계양력계수를 의미한다.

그리고 마지막 두자리 수는 최대 두께의 시위 길이에 대한 백분율을 표시한다. 따라서 6은 6자리 계열을, 3은 압력이 가장 낮은 점의 위치가 시위길이의 0.3, 하첨자 2는 최소항력계수를, 2는 설계양력계수가 0.2임을 나타내고 15는 최대 두께가 시위길이의 15%임을 나타낸다. 보통 NACA 6자리 계열의 익형은 매우 얇은 뒷전을 가지도록 설계된다. 따라서 유한한 뒷전 각을 갖도록 설계된 것은 NACA 63A215 등으로 표시되며, 여기서 A는 개량된 익형(advanced airfoil)을 나타낸다.

2-D 익형의 형상은 익형표면을 지나는 수많은 점들의 스플라인 곡선(spline curve)으로 정의된다. 수치계산을 하기 전에 익형의 격자계를 생성시키기 위하여 UIUC Applied Aerodynamics Group에서 제공하는 2-D NACA 63<sub>2</sub>-215 익형의 좌표 점을 이용하였다. 익형의 형상을 정의하는데 있어 보다 정확한 형상을 얻기 위하여, 익형의 앞전부와 뒷전 부에 형상 좌표 점을 집중시켰으며, 상·하부에 각각 100개의 형상 좌표 점을 분포하여 정의하였다. Fig. 4.2에 2-D 익형의 표면 형상 좌표 점 분포를 나타내었다.

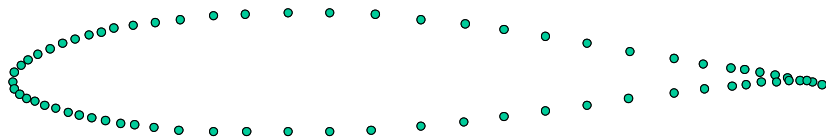


Fig. 4.2 Point distribution defining NACA 63<sub>2</sub>-215  
airfoil geometry

## 4-2-2 Bench Mark 계산

본 연구에 사용된 상용 CFD 코드인 FLUENT의 해석능력 검증을 위하여 NACA 4412 익형에 대하여 Wadcock의 실험결과와 비교하였다. 수치계산을 위한 격자계에서 원방 경계는 익형 코드길이의 30배를 취하였다.

Fig. 4.3에 본 연구에 사용된 계산 격자의 모습을 나타내었다.

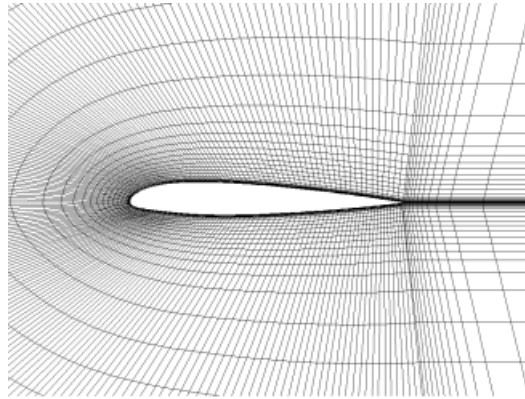
FLUENT는 난류모델에 대하여 1-eq인 Spalart-Allmaras모델과 2-eq에서는 k- $\epsilon$ 모델(standard, RNG, realizable), 그리고 Large Eddy Simulation의 모델들을 제공한다. 하지만, 본 연구에서는 비교적 계산 수렴 성이 좋고, k- $\epsilon$ 모델과 비교할 때 외부유동장의 익형 계산에서 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있는 Spalart-Allmaras모델을 사용하였으며[19], 시간에 대하여 implicit, 운동량과 난류전달 방정식에 대하여 QUICK scheme을 사용하였다. 그리고 익형 표면 격자 수는 앞선 연구자들의 연구논문을 참고하여 200 노드의 충분한 노드 점을 분포시켰으며, 총 격자 수는 300×200의 C type 격자이다. 본 연구의 수치계산 조건을 Wadcock의 실험조건과 정확히 일치시키기 위해 마하수(mach number)는 0.085, 레이놀드수(Reynolds number)는  $1.64 \times 10^6$ 으로 취하였다. Table 4.1은 영각(angle of attack)이 0°과 8°일 때의 양항비 ( $L/D$ ), 항력 ( $C_d$ ), 그리고 양력 ( $C_l$ )의 값에 대한, 계산 값과 실험 값의 비교를 보여주고 있다. 이 비교를 통하여 수치계산 결과가 실험결과와 잘 부합된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.4는 NACA 4412 기본 익형에 대하여 실험결과와 수치 계산한 결과를 압력계수 값으로 비교한 것이다. 익형의 받음각은 8°로

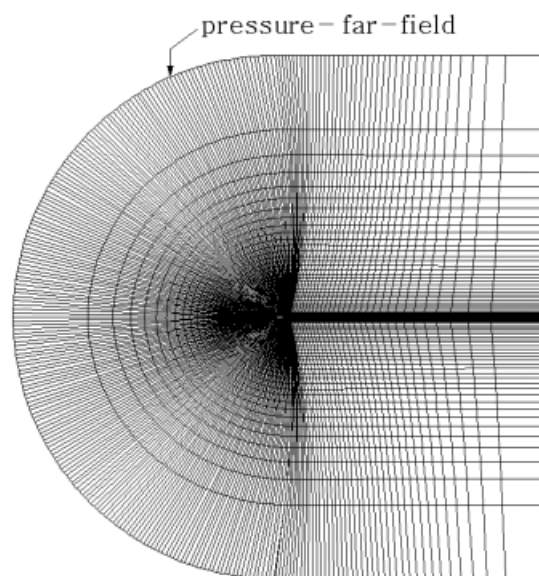
고정하였다.

그래프에서 보면, 수치계산 한 결과와 실험 결과를 비교하여 볼 때 압력계수 값이 익형의 앞전과 뒷전에서 약간의 오차는 보이지만, 전체적으로 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 비교로부터 본 논문에서 사용한 수치해법이 매우 만족스러운 결과를 제시하고 있다는 결론을 내릴 수 있다.





(a) Close-up of grid near the airfoil



(b) C type grid used in computations

Fig. 4.3 Grid formation, NACA 4412

Table 4.1 NACA 4412 ( $Re=1.64 \times 10^6$ )

		$\alpha=0^\circ$			$\alpha=8^\circ$		
		$C_l$	$C_d$	$L/D$	$C_l$	$C_d$	$L/D$
No flap	Exp.	0.410	0.012	34.17	1.16	0.022	52.73
	Com.	0.428	0.013	32.92	1.19	0.024	49.6

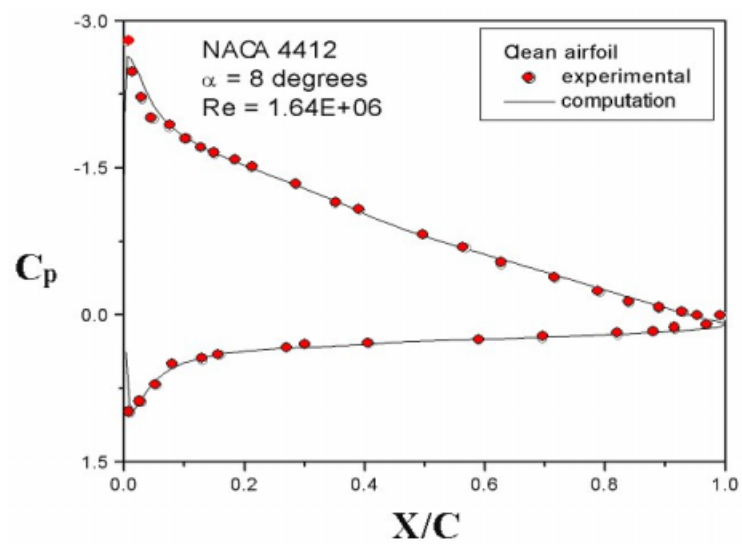


Fig. 4.4 Pressure distribution comparison



### 4-2-3 계산조건

벤치마크 계산을 통한 계산코드의 신뢰성을 바탕으로, 실제 NACA 63<sub>2</sub>-215 익형에 대한 본 계산을 수행하였다. 본 연구에서는 NACA 63<sub>2</sub>-215 익형의 후연 아랫면에 각각 45°, 60°, 90°, 105°, 135°의 각도를 가지는 플랩을 설치하고, 익형 코드길이의 0.5 %~2.0 % 범위 내에서 플랩 크기를 0.5 %씩 증가시키면서 수치계산을 수행하였으며, 레이놀즈 수는  $2.4 \times 10^5$  이다. 익형의 받음각은 8°로 설정하였다.

본 수치계산에 사용된 플랩의 종류를 Fig. 4.5에 나타내었다.

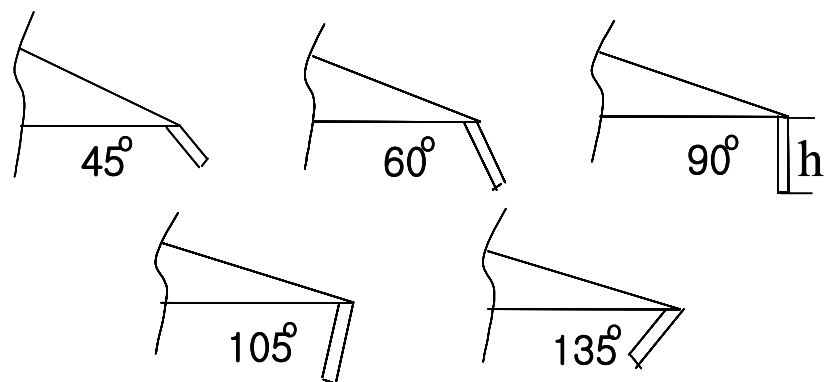


Fig. 4.5 Flap dimensions for computation

### 4-3 결과 및 고찰

플랩의 높이  $h$ 와 장착각도에 따른 양력계수의 변화를 Fig. 4.6에 그래프로 나타내었다. 플랩의 크기가 익형 코드길이의 0.5%인 경우, 90°각도로 장착된 플랩에서 익형의 양력계수가 가장 높게 나타나고 있으며, 이는 플랩의 크기가 코드길이의 1%인 경우에서도 마찬가지이다. 반면, 1.5% 크기의 플랩이 장착된 경우, 플랩이 105°의 각도로 익형에 장착되었을때 가장 큰 양력계수를 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 플랩의 크기가 2.0%인 경우는 0.5%, 1%의 플랩이 장착된 결과와 동일하게 플랩이 90°각도로 장착된 익형의 양력계수가 가장 우수하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

전체적으로, 플랩의 크기가 1.5%인 경우를 제외하고 모두 플랩 장착 각도가 증가함에 따라 양력계수 값이 증가하다가 플랩의 장착 각도가 90°에 이른 이후부터는 점점 감소하는 추세를 보이고 있다. 1.5 % 크기의 플랩이 장착된 익형의 경우, 양력계수가 점점 증가하다가 플랩 장착각도 105°를 기점으로 점점 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 그래프를 통해서 NACA 63<sub>2</sub>-215 익형에서 가장 우수한 양력계수를 얻을 수 있는 플랩의 조건은 1.5% 크기를 가지고 105°각도로 장착된 플랩임을 알 수 있다.

Fig. 4.7은 서로 다른 크기의 플랩 장착 각도 변화에 따른 양항비의 변화를 그래프로 보여주고 있다. 이 그래프에서 보면, 플랩의 크기가 익형 코드길이의 0.5%, 1%, 1.5%, 2%인 경우 모두 플랩이 익형의 후연 아랫 면에 90°각도로 장착이 된 경우에서 양항비가 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 모든 경우에서 양항비

는 계속 증가하는 추세를 보이다가 90°를 기점으로 점점 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 4.6에서 단지, 양력계수 값을 생각했을 때 가장 높은 값을 가지는 플랩의 장착 각도는 105°임에 반해, 모든 익형의 공력특성을 결정하는 지표인 양항비를 나타낸 Fig. 4.7의 그래프를 살펴보면, 가장 성능이 우수한 플랩은 장착각도가 90°이며, 1.5%의 크기를 갖는 플랩임을 알 수 있다. 따라서 본 수치해석에서 사용된 플랩 중 NACA 63<sub>2</sub>-215 익형에 장착하였을 때 가장 우수한 공력특성을 얻을 수 있는 종류의 플랩은 익형 후연 끝단에 90°의 각도로 장착된 1.5% 크기를 가지는 플랩이다.

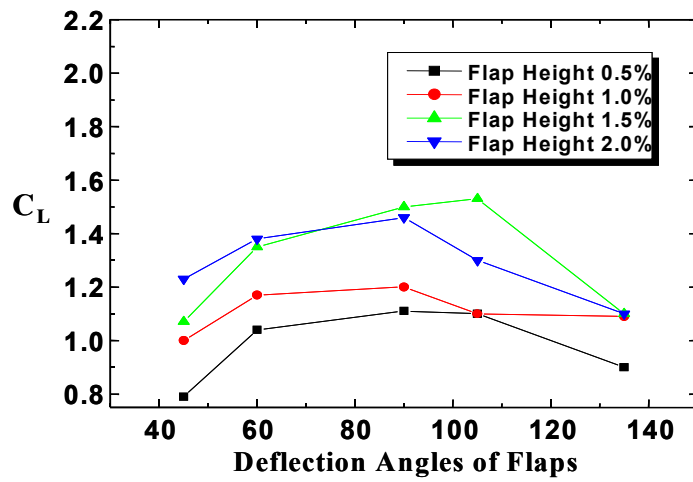


Fig. 4.6 Relationship between deflection angles of flaps and  $C_L$  at flap heights

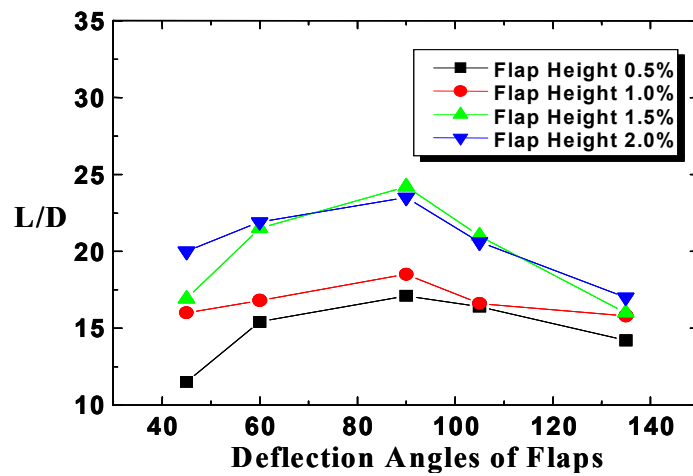
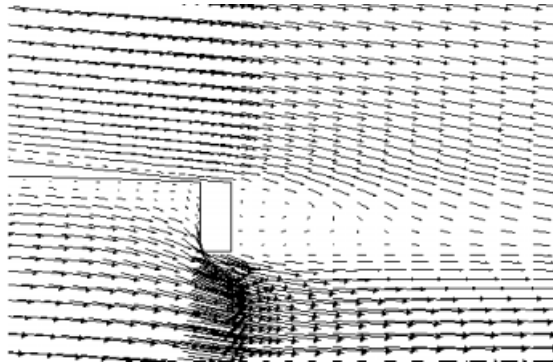


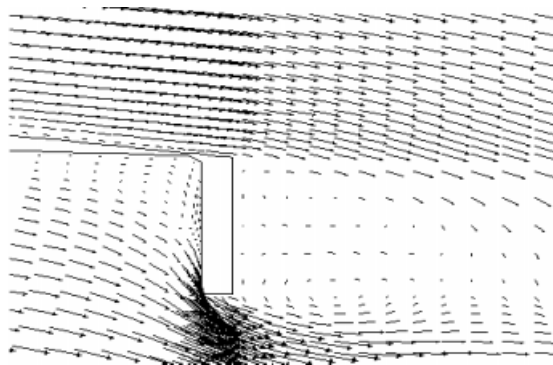
Fig. 4.7 Relationship between deflection angles of flaps and  $L/D$  at flap heights

Fig. 4.8은 익형의 후연 아랫면에 장착된 90°플랩 주위의 속도분포를 나타내었다. 플랩의 크기가 커질수록 Gurney flap으로 부터 익형의 전연쪽으로 와류의 발생이 점점 커지고 있음을 알 수 있으며, 90°플랩의 아래쪽에서 속도가 빠르게 나타나는 유동패턴을 관찰 할 수 있다. 0.5% 크기의 90°플랩의 후방으로 발달하는 와류는 플랩의 크기가 커질수록 점점 상하 대칭의 형태로 발달하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.9는 90°플랩 주위의 압력분포를 나타내고 있으며, 플랩이 장착된 주위에서의 압력 분포가 대체로 높게 나타나고 있음을 알 수 있고, 플랩의 크기가 증가 할 수록 익형의 윗면과 아랫면의 압력 차 또한 점점 증가하고 있으며, 이는 양력의 상승 및 하강을 발생시키는 직접적인 원인이 된다. 또한, 2% 크기의 플랩이 장착된 경우의 압력 값이 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 플랩을 장착할 경우 플랩에 의한 영향으로 익형 아랫면의 압력은 플랩을 장착하지 않는 경우 보다 높은 압력 값을 가지게되고, 익형의 윗면과 아랫면의 압력 차는 더욱 크게 발생하게 된다. 반면 플랩의 영향으로 인한 익형의 항력 또한 증가하게 되는데, 보통 코드길이의 2% 범위 내에서는 항력의 증가율 보다 양력의 증가율이 더 크므로, 적절한 크기의 플랩을 장착한 익형은 플랩을 장착하지 않은 익형보다 더욱 높은 양력 값을 가지게 되며, 익형의 공력특성을 결정하는데 중요한 요소인 높은 양항비를 얻을 수 있다.

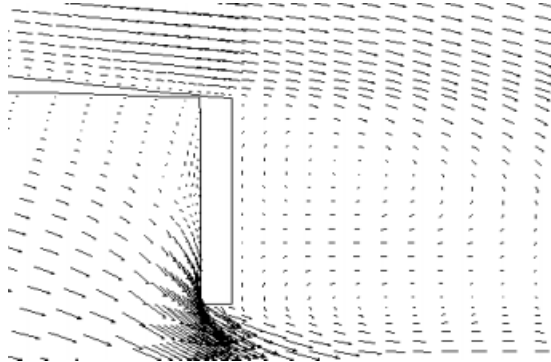


(a) Flap height=0.5%

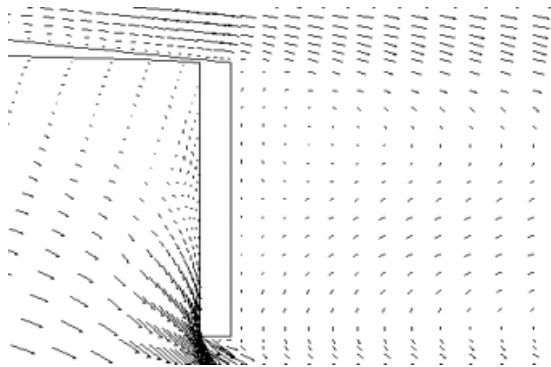


(b) Flap height=1%

Fig. 4.8 Velocity distribution around Gurney flaps  
(to be continued)



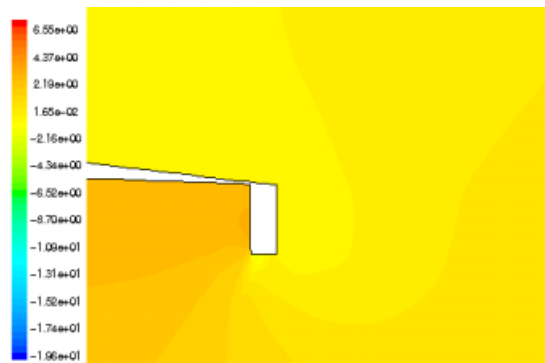
(c) Flap height=1.5%



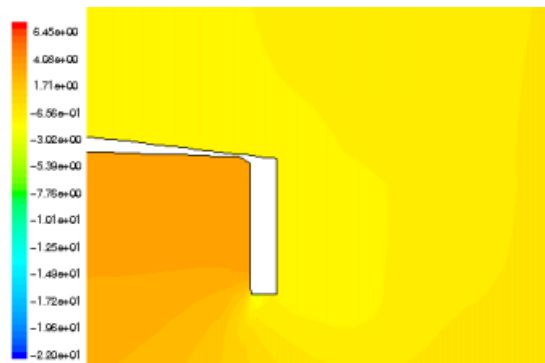
(d) Flap height=1.5%

Fig. 4.8 Velocity distribution around Gurney flaps



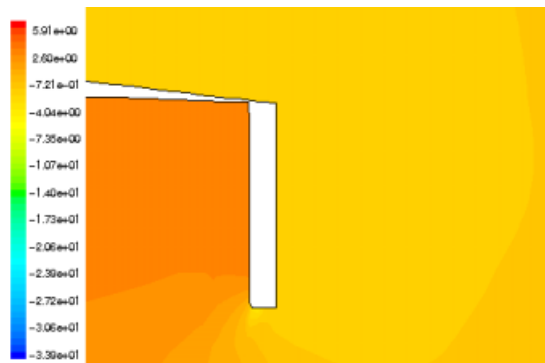


(a) Flap height=0.5%



(b) Flap height=1%

Fig. 4.9 Pressure distribution around Gurney flaps  
(to be continued)



(c) Flap height=1.5%



(d) Flap height=2%

Fig. 4.9 Pressure distribution around Gurney flaps

## 제 5 장 CFD에 의한 3차원 TUDelft T40/500 모델의 수치해석

### 5-1 형상 모델링 및 계산격자

#### 5-1-1 T40-500 로터 블레이드 3-D 모델링

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 로터 블레이드는 직경이 40m 이고 정격출력이 500kW인 3 블레이드 수평축 풍력발전용 터빈 (HAWTs)이다.

T40/500의 출력제어 방식은 현재 상용화되고 있는 풍력발전기의 대다수가 채택하고 있는 실속제어형(stall-regulated)이다.

계산 격자를 생성하기 위한 초기 모델링 작업은 3차원 캐드 모델링 툴인 CATIA를 이용하여 실제 모델의 3차원 좌표 점을 통해 이루어졌으며, 계산의 정확성을 고려하여 블레이드를 허브로부터 팁 부분까지 모두 10개의 단면으로 분할 한 후, 분할된 2차원 단면을 스플라인(spline)으로 연결하여 3차원 블레이드를 생성하였다.

실제 풍력발전용 로터 블레이드의 inboard 부분은 보통 허브로부터 15% 지점까지의 부분으로 정의되며, 설계단계에서 구조적 설계에 중점을 두는 부분이고, outboard 부분은 15% 지점에서부터 팁 부분 끝단까지의 영역으로 정의되며, 전체 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 부분이며, 공력설계에 중점을 두는 부분이다. inboard 부분은 전체적인 시스템의 출력특성에 큰 영향을 미치지 않으므로, 수치적 방법을

이용한 출력특성을 예측하는 부분에 있어서는 고려대상이 되지 않는 것이 일반적이다. 하지만, 보다 정확한 풍력발전 시스템의 출력특성을 예측하고, 블레이드 전체에 걸쳐 작용하는 복잡한 구조의 3차원 유동현상을 정확하게 예측하기 위하여 본 연구에서는 inboard 부분을 포함한 전체 블레이드 영역에 대한 수치해석을 수행하였다. 블레이드를 구성하는 익형의 형태는 블레이드의 outboard 부분의 허브 부분으로부터 팁 부분까지 DU-91-W-250, DU-93-W-210, NACA 63618 등의 익형으로 구성되어 있다. 격자생성을 위한 로터 블레이드의 3차원 형상을 Fig. 5.1에 나타내었다.



Fig. 5.1 3-D Rotor blade configuration (T40/500)

## 5-1-2 계산격자의 생성

수치해석을 하는데 있어서 해의 정확도를 좌우하는 가장 중요한 부분의 하나가 계산격자이며, 우수한 품질의 격자를 생성하기는 그리 쉽지가 않다. 본 연구에서는 격자를 생성하는 과정에서 복잡한 형상에 대하여 상당히 우수한 3차원 정렬격자를 생성할 수 있는 ICEM-CFD Hexa 모듈을 이용하였다. 격자를 생성하는 과정에서 블레이드 주위에서 우수한 격자를 확보하기 위하여 전체 도메인을 56 블록으로 나누었으며, 해석결과의 신뢰성 및  $k-w$  난류모델의 해석 정확도를 고려하여 블레이드 주위에 격자를 집중 배치하였다. 계산에 사용된 전체 도메인의 격자 수는 약 800,000 cell 이며, Fig. 5.2와 Fig. 5.3에 생성된 격자를 나타내었다.

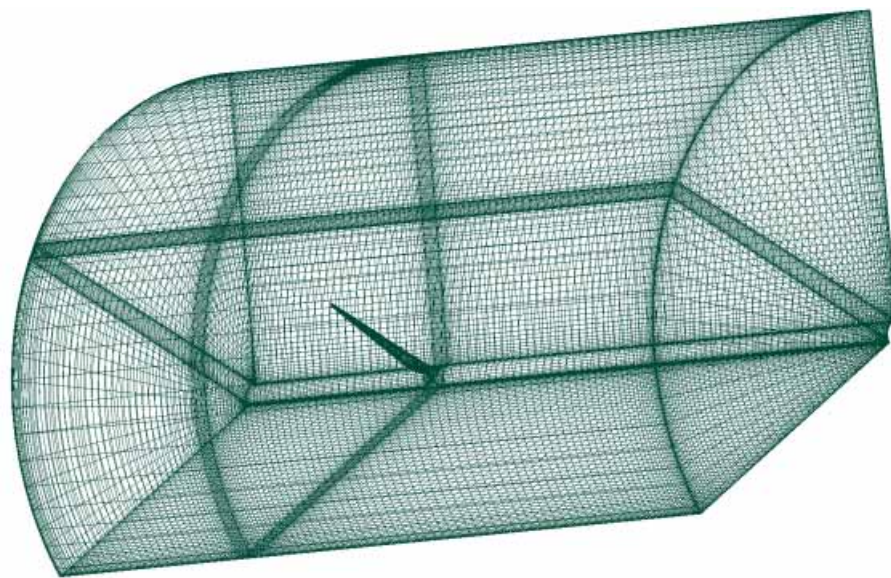


Fig. 5.2 Computational grid

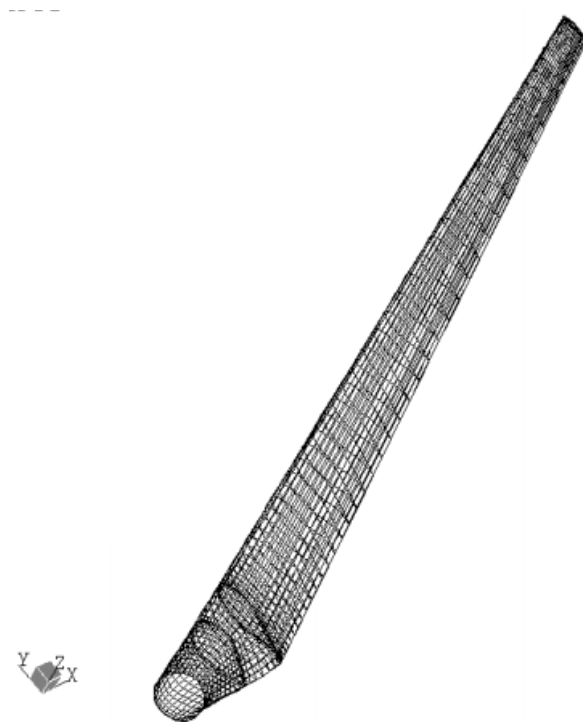


Fig. 5.3 Computational grid near the rotor



## 5-2 경계조건 및 계산조건

계산영역 내 입구경계조건은 균일 유입속도조건을 주었으며, 원통 좌표계로 정의된다. 출구경계조건은 유체가 전체 계산영역의 경계면을 빠져나가는 것으로 정의되며, 동일 압력조건을 부여하였다. 로터 블레이드에는 no-slip 조건 및 회전 조건을 부여하였으며, 본 연구에서는 효율적인 계산을 위하여 유동이 정상적이고 주기적이라는 가정 하에, 하나의 블레이드 계산영역만을 대상으로 하였다. 단일 계산영역의 주기 경계면은 주기조건으로 처리하였다.

본 연구의 수치해석 모델로써 채택된 T40/500 에 대한 실험은 아직 수행되지 않은 상태이며, 현재 델프트 대학 풍력에너지 연구그룹에 의해 1:0.23으로 축소된 모델에 대하여, BEM (Blade Element Momentum Theory)법에 의한 수치 해석 결과만이 제시되어 있는 상태이다. 본 연구에 사용된 로터의 형상정의를 위해 제공받은 3차원 CAD 데이터는 1:0.23으로 축소된 모델이며, 이때 축소된 모델의 로터 블레이드 직경은 9.2m이고, 허브 직경은 0.522m이며, +0.5°의 피치 각을 가진다. 일반적으로 풍력발전기의 성능을 나타내는데 있어서 가장 보편화된 방법은 TSR(Tip Speed Ratio,  $\lambda$ )의 변화에 따른 동력 계수( $C_p$ )의 변화를 나타내는 것이다. TSR이란, 로터 블레이드로 불어오는 풍속( $V_i$ )과 블레이드 팁 부분에서의 주속 비로 정의되며, 무차원 수이며 식 (3.3)에 정의되었다.

실제로 풍력발전 시스템의 로터 블레이드는 유입풍속의 변화에 따라 로터 블레이드의 회전속도가 변하지만, 이와 같은 상황을 고려하여 수치해석을 하려면, 실제 로터 블레이드의 풍속 변화에 따른 회전

속도 변화를 실험을 통해 얻어야만 하는 불편이 있다. 따라서, 본 연구에서는 무차원 수인 TSR을 이용하여 유입풍속을 고정하고 로터 블레이드의 회전속도만 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하였다. 유입풍속은 5m/s이며, 회전 속도는 30~100rpm으로 변화시켜, 모두 8가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 이때 TSR은 2.89~9.63의 범위를 가진다. 계산조건으로 선정한 TSR의 범위는 BEM에 의해 해석된 TSR의 범위와 정확히 일치하며, Table 5.1에 전체 계산 조건을 요약하여 나타내었다. 모든 계산은 Pentium 4 PC(1.7GHz, 1GB)에서 수행되었다. 정상상태 계산은 모두 반복계산이 200 번 정도일 때 수렴하였으며, 계산 소요시간은 각 케이스별로 최소 8시간에서 최대 12시간이 소요되었다.

계산을 수행하기에 앞서 원활한 해의 수렴성과 안정성을 확보하기 위하여, 초기에 약 120,000 Cell의 격자 수를 가지는 도메인을 가지고 계산을 수행한 후 U, V, W 방향의 속도 성분과 대략적인 유동장의 정보를 획득하여, 실제 계산을 하기 위한 초기조건의 값으로 사용하였다.

Table 5.1 Calculating conditions

	$V_i(\text{m/s})$	RPM	TSR
Case 1	5	30	2.89
Case 2	5	40	3.85
Case 3	5	50	4.82
Case 4	5	60	5.78
Case 5	5	70	6.74
Case 6	5	80	7.71
Case 7	5	90	8.67
Case 8	5	100	9.63

### 5-3 결과 및 고찰

#### 5-3-1 Wake 구조에 대한 유동 해석

로터 블레이드로 유입되는 바람은 회전하는 블레이드에 대한 영향으로 하류(down stream)쪽으로 발달되는 후류를 발생시키게 된다. 이때 발생하는 후류는 허브와 가까운 위치에서 발달하는 중심와류(central vortex)와 팁 부분에서 발생하는 팁 와류(tip vortex)의 두 가지로 구분된다. 일반적으로 로터 블레이드 후방으로 발달되는 후류 구조는 로터의 회전 속도가 빨라질수록 팁 와류의 간격이 점점 좁아지게 되며, 상당히 복잡한 구조의 3차원 와류를 발생시키게 된다.

Fig. 5.4에 이론적으로 제시된 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 거동을 그림으로 나타내었다.

Fig. 5.5는 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 구조와 속도분포를 TSR의 변화(2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74, 7.71)에 따라 나타낸 것이다. Fig. 5.5에 유선으로 나타낸 후류의 구조는, Fig. 5.4에서 제시된 이론적인 구조와 잘 일치함을 알 수 있으며, 복잡한 3차원 후류를 정성적, 정량적으로 명확하게 보여주고 있다. 회전하는 로터 블레이드를 통과해 빠져나가는 기류의 속도 성분은, 회전 축 방향의 속도 성분과 로터의 회전방향 속도 성분의 합력으로 나타내어질 수 있다. Fig. 5.5에 제시된 결과들로 각각의 속도 성분을 정확하게 예측 할 수는 없지만, 각각의 결과의 우측에 위치한 속도 값들을 통하여, TSR 값이 증가할수록 후방으로 발달하는 후류의 최고속도 성분 값은 점점 증가하고 있음을 알 수 있다. TSR이 증가한다는 의미는, 로터 블레이

드의 회전 속도가 증가한다는 것이므로, 회전방향으로의 속도성분은 점점 증가한다. 따라서, TSR이 증가할수록 후류의 최고 속도 값은 증가하고 있으므로 축 방향 성분보다 회전방향 속도 성분의 증가율이 더 크게 되어, 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 주기가 점점 짧아지고 있음을 알 수 있으며, 허브에 근접한 부분으로부터 발달되는 중심와류는 TSR이 증가함에 따라, 더욱 복잡한 3차원 유동패턴을 나타낼 수 있다.

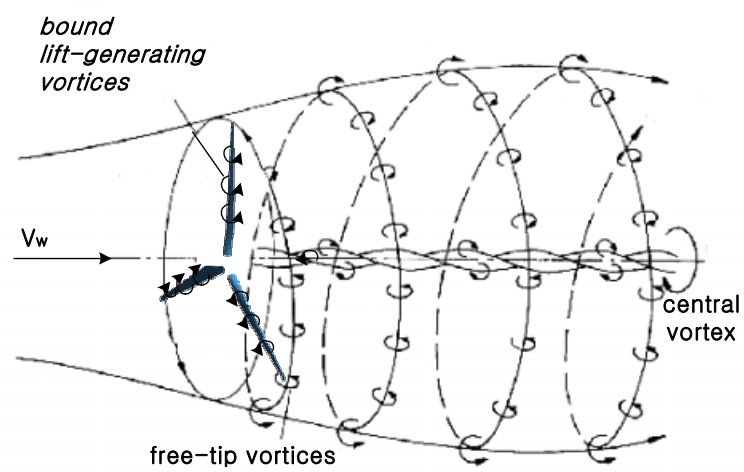
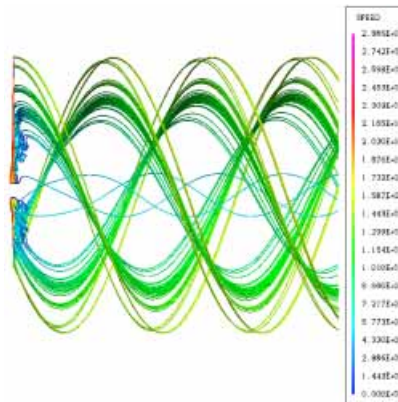
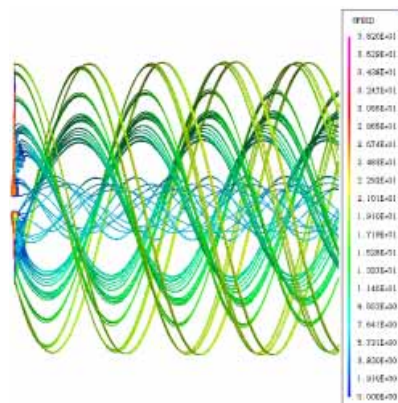


Fig. 5.4 Sketch of wake distribution

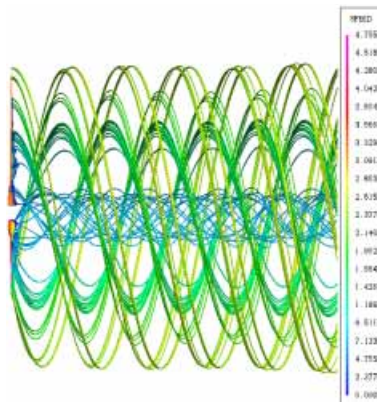


(a) TSR=2.89

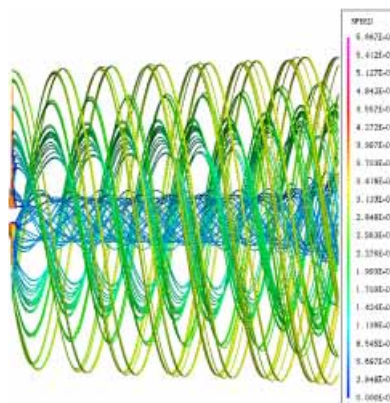


(b) TSR=3.85

Fig. 5.5 Calculated wake distribution comparison  
(TSR 2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74 and 7.71)  
*(to be continued)*



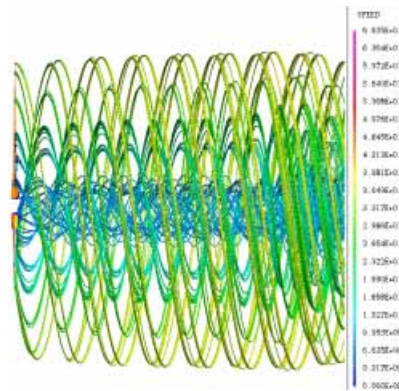
(c) TSR=4.82



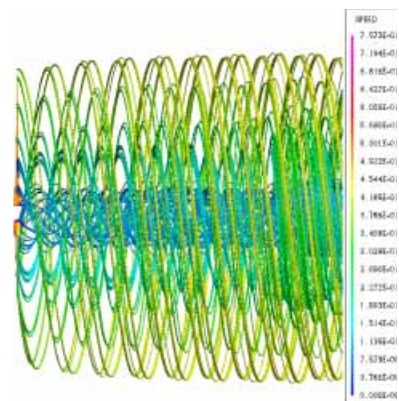
(d) TSR=5.78

Fig. 5.5 Calculated wake distribution comparison  
(TSR=2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74 and 7.71)  
(to be continued)





(e) TSR=6.74



(f) TSR=7.71

Fig. 5.5 Calculated wake distribution comparison  
(TSR=2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74 and 7.7)

### 5-3-2 블레이드 표면 3차원 실속 현상

일반적으로, 실속(stall)은 대부분의 경우, 반드시 피해야만 할 문제로써 생각되고 있으나, 풍력발전에 있어서는 이러한 실속이 출력을 제어하는 방법의 하나로 이용된다. 이러한 방법을 실속제어형이라 하며, 풍력발전용 터빈의 운전범위가 정격출력을 넘어서게 될 때, 블레이드의 표면에 강한 3차원 실속을 발생시키게 하여, 안전한 회전수 내에서 최적의 출력을 낼 수 있게 제어하는 방법이다. 실제, 풍력발전용 로터 블레이드에서 발생하는 3차원 유동은 Fig. 5.6에서 스케치한 것처럼 상당히 복잡하다. 로터 블레이드의 허브 쪽에서 발생하는 박리에 의해 분리된 기류는 로터 블레이드의 원심력과 반경방향으로의 압력 분포에 의하여, 블레이드의 허브쪽에서 팁부분으로 이동하게 된다. 이러한 기류가 outboard 부분의 블레이드 표면에 부착되어  $\theta$  방향으로 흐르는 기류를 통과하는 동안 3차원 실속을 발생시키며, 임의의 지점에서  $\theta$  방향으로 분리된다. 반경방향으로 흐르는 기류는 블레이드 전체에 걸쳐 익형의 전연과 후연에서도 발생 할 수 있으며, 그 발생원인에 대한 정량적인 데이터의 제시는 거의 불가능하지만, 익의 전·후연에서 발생하는 기류의 영향 또한 크다고 보고되어 있다.

Fig. 5.7은 TSR 3.85인 경우 블레이드 표면에서의 계산결과이며, Fig. 5.6과 상당히 유사함을 알 수 있다.

Fig. 5.8에 블레이드의 TSR이 변화하는 경우에 대해 표면에서 발생하는 3차원 실속영역의 범위 및 유동패턴을 나타내었다. TSR이 증가할수록 블레이드 표면 쪽으로 3차원 실속영역이 점점 축소되고 있음을 알 수 있다.

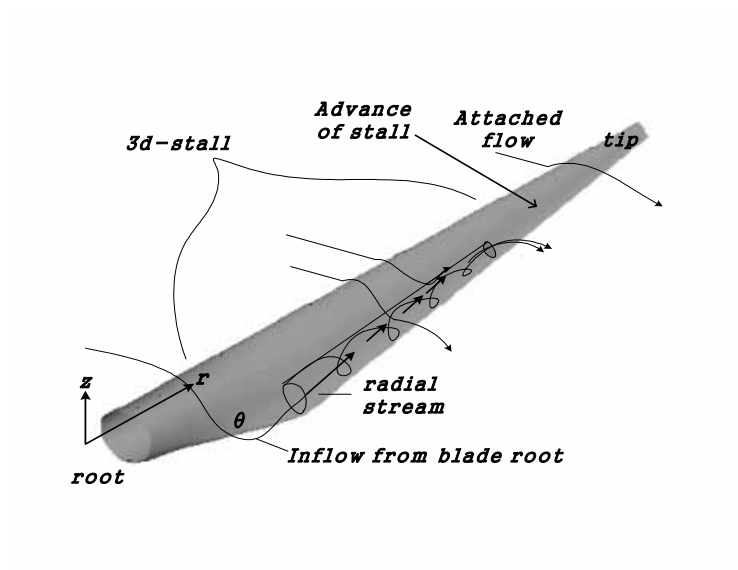


Fig. 5.6 Sketch of 3-D stall at blade surface

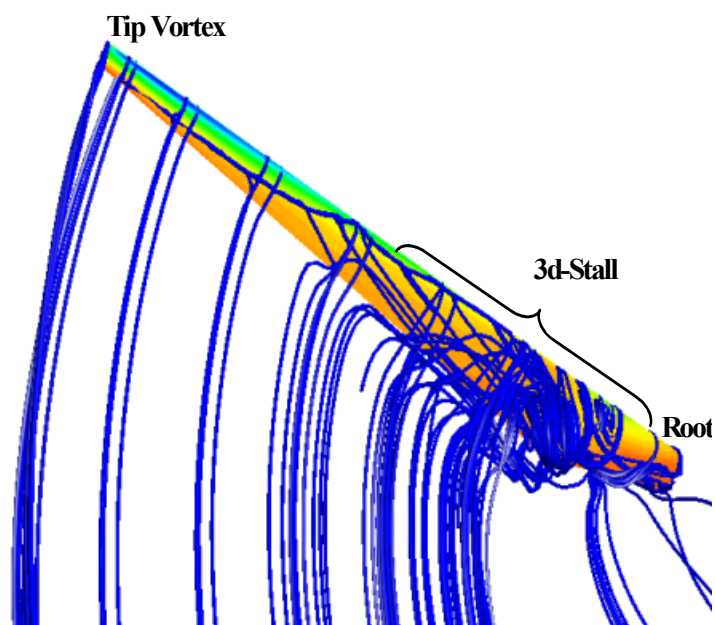
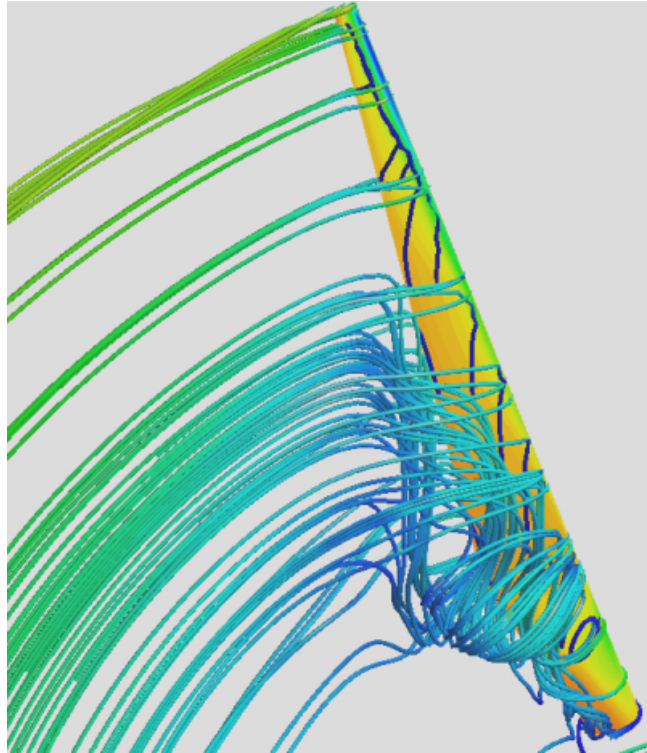
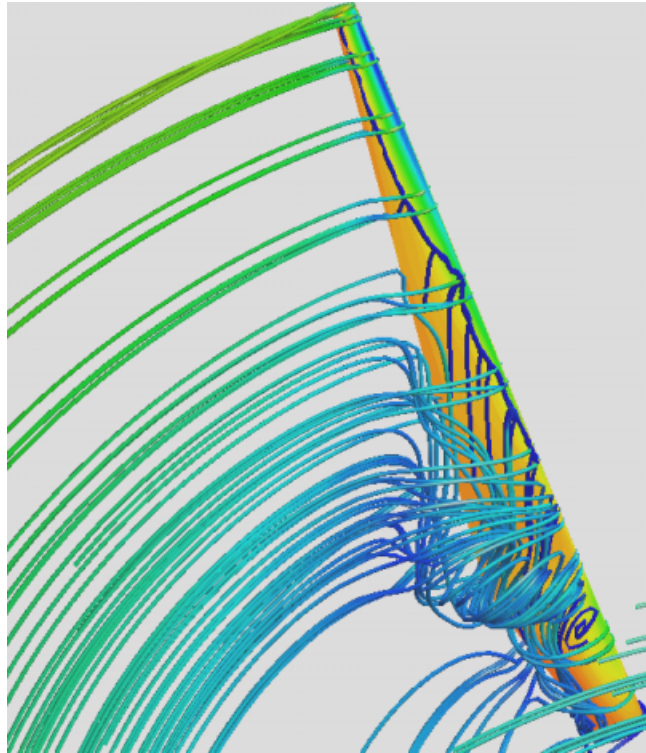


Fig. 5.7 Example of calculated 3-D stall near blade  
(TSR=3.85)



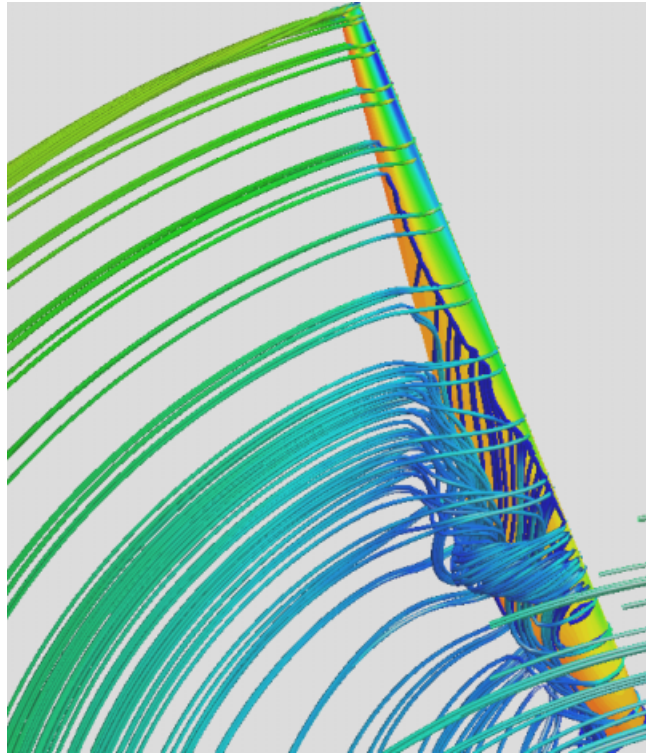
(a)  $TSR=2.89$

Fig. 5.8 Calculated wake distribution comparison  
( $TSR=2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74$  and  $7.71$ )  
*(to be continued)*



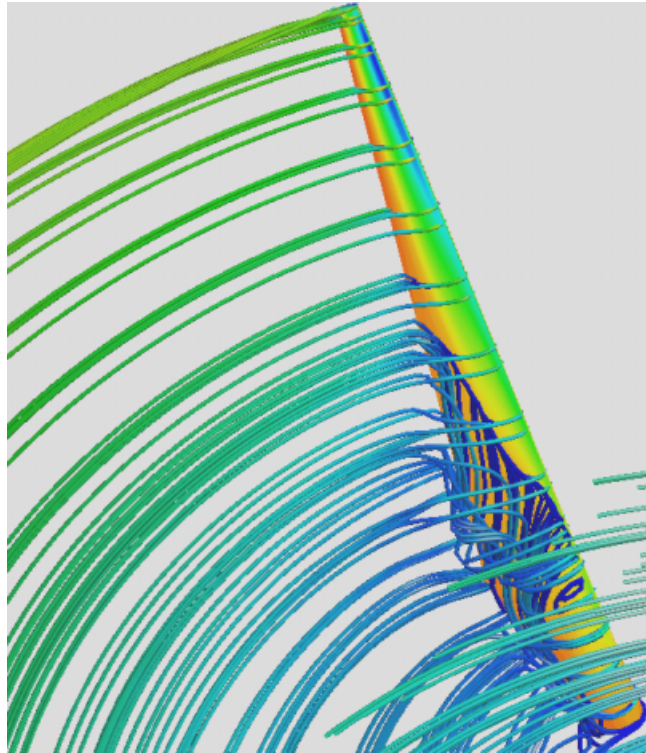
(b) TSR=3.85

Fig. 5.8 Calculated wake distribution comparison  
(TSR=2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74 and 7.71)  
*(to be continued)*



(c) TSR=4.82

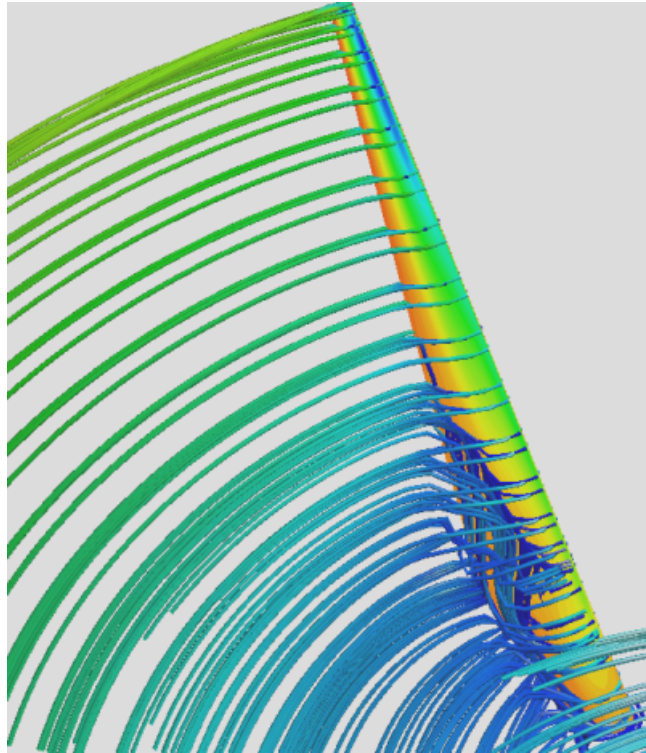
Fig. 5.8 Calculated wake distribution comparison  
(TSR=2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74 and 7.71)  
*(to be continued)*



(d) TSR=5.78

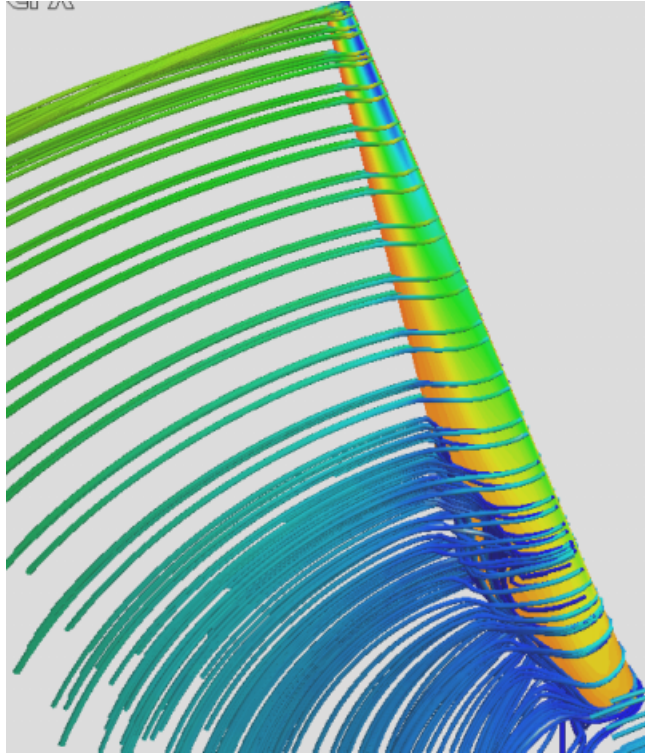
Fig. 5.8 Calculated wake distribution comparison  
(TSR=2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74 and 7.71)  
*(to be continued)*





(e) TSR=6.74

Fig. 5.8 Calculated wake distribution comparison  
(TSR=2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74 and 7.71)  
*(to be continued)*



(f) TSR=7.71

Fig. 5.8 Calculated wake distribution comparison  
(TSR=2.89, 3.85, 4.82, 5.78, 6.74 and 7.71)

### 5-3-3 블레이드 주위 및 표면 압력분포

Fig. 5.9에 한 예로서 TSR이 3.85인 경우의 블레이드 표면에서의 압력분포를 나타내었다. 로터 블레이드로 유입되는 바람을 직접 받는 압력면(pressure side)에서의 압력이 블레이드 팁 부분으로 갈수록 높은 분포를 보이고 있고, 익형의 전연 부분에서 대체적으로 높은 압력 분포를 나타내고 있다. 블레이드의 흡입 면(suction side)에서의 압력 분포는 허브에서 팁 방향으로 갈수록 익형의 전연 부분에서 낮은 압력 분포를 보이고 있다. 로터 블레이드로 유입되는 바람의 속도와 블레이드 회전속도의 합력인 상대속도(relative speed)는 임의의 받음각을 가지고 블레이드의 앞전으로 향하게 되고, 이때 블레이드의 압력면과 흡입 면에서 발생하는 압력 차에 의하여 양력이 발생하여 블레이드가 회전하게 된다. 블레이드 각 부분에서의 2차원 익형 단면으로 유입되는 속도가 빠를수록 압력 차가 더 크게 발생하게 되는데, 수치 해석을 통한 결과를 살펴보면 블레이드 팁 쪽으로 갈수록 압력 면과 흡입 면에서의 압력 차가 증가하는 것을 알 수 있다.

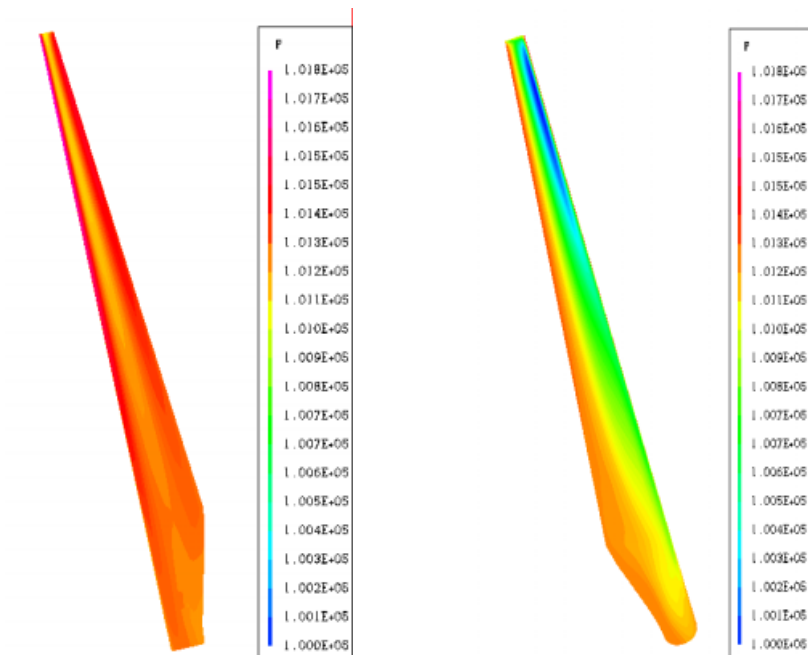
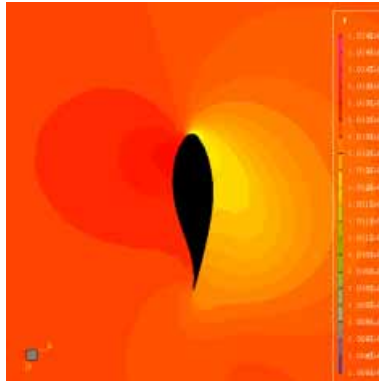
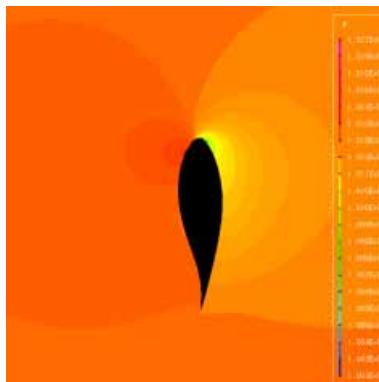


Fig. 5.9 Pressure distribution (TSR=3.85)

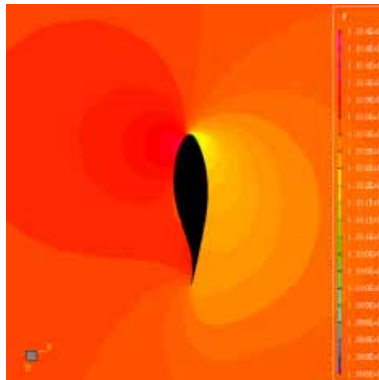


(a) TSR=3.85

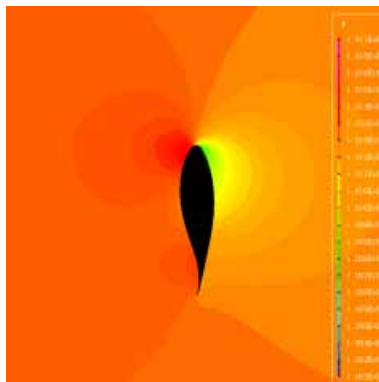


(b) TSR=6.74

Fig. 5.10 Pressure distribution on planes of constant radius  
[from hub to tip, 20%] (*to be continued*)

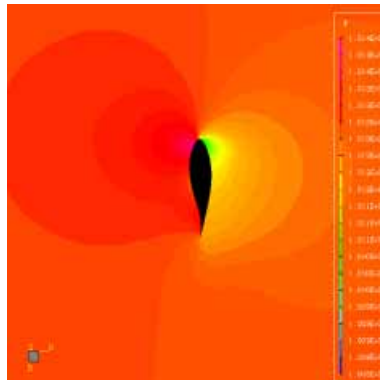


(a) TSR=3.85

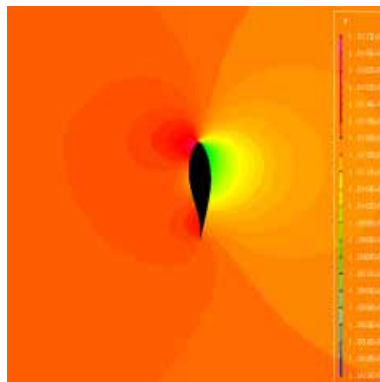


(b) TSR=6.74

Fig. 5.10 Pressure distribution on planes of constant radius  
[from hub to tip, 20%] (*to be continued*)

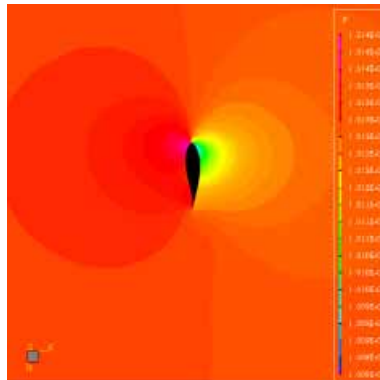


(a) TSR=3.85

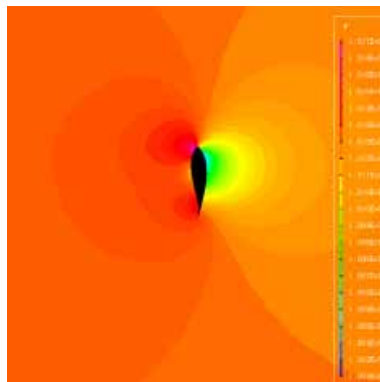


(b) TSR=6.74

Fig. 5.10 Pressure distribution on planes of constant radius  
[from hub to tip, 20%] (*to be continued*)



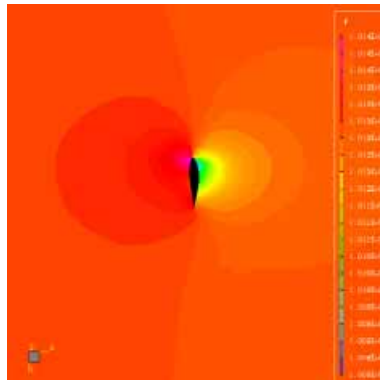
(a) TSR=3.85



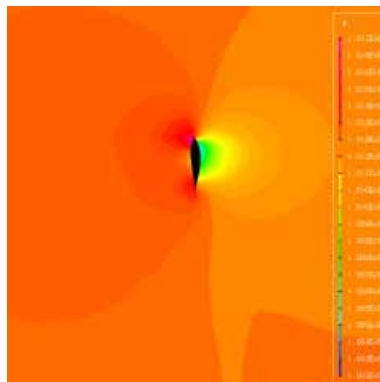
(b) TSR=6.74

Fig. 5.10 Pressure distribution on planes of constant radius  
[from hub to tip, 20%] *(to be continued)*





(a) TSR=3.85



(b) TSR=6.74

Fig. 5.10 Pressure distribution on planes of constant radius  
[from hub to tip, 20%]

#### 5-3-4 T40/500 로터 블레이드의 성능 평가

CFD 기법은 이미 수많은 익형의 공력 특성을 예측하는데 있어 많은 적용가능성을 보여왔으며, 보다 우수한 수치적 기법들의 개발과 우수한 품질의 격자를 통하여 실속 후 공력특성까지 비교적 정확하게 예측 할 수 있다. 풍력발전용 터빈을 설계함에 있어서 가장 핵심적인 요소인 로터 블레이드의 설계에 필요한 신뢰성 있는 2차원 익형의 공력특성은 필수적이며, 지금까지는 주로 실험에 의한 데이터에만 의존하여 왔으나, 이는 설계자들의 입장에서는 상당히 까다롭고 많은 시간과 비용을 초래하는 작업이므로, 기존에 제공되는 데이터 외의 실제 적용될 새로운 데이터를 얻기란 거의 불가능한 일이다. 따라서, 다양한 수치기법들의 개발 등에 의한 CFD 기법의 발달로, 설계에 필요한 기초 데이터를 얻기 위해 이를 적용하는 단계이며, 상용 CFD 코드의 적용성을 평가하는 단계이다. 이 모든 것을 종합해 볼 때, 전체적으로 로터 블레이드 설계자들이 가장 관심을 가지고 있는 부분은, 현재의 CFD 기술로써 얼마나 정확하게 터빈의 성능을 예측할 수 있는지 이며, 이는 TSR의 변화에 따른 터빈의 출력 특성을 나타냄으로써 제시할 수 있다.

본 연구에서의 성능평가는 다음과 같은 순서로 이루어졌다.

- 1) CFX-TASCflow를 이용하여 각각의 조건에서의 토크 값(T)을 구한다.
- 2) 다음의 식 (5.2)를 이용하여 로터 블레이드 출력( $P_w$ )을 계산한다.

$$P_w = \Omega \cdot T \quad (5.2)$$

3) 계산된 각각의 경우에서의 출력 값을 동력계수(  $C_p$ )를 구하는 식 (5.3)에 대입하여 동력계수를 구한다.

$$C_p = \frac{P_w}{\frac{1}{2} \rho V_i^3 A} \quad (5.3)$$

단, 여기서  $\rho$ 는 밀도를,  $A$ 는 블레이드 단면적을 의미한다.

BEM 법은 블레이드 국부 위치에서의 2차원 익형단면의 공력특성인 양력과 항력의 신뢰성 있는 데이터를 바탕으로, 로터가 비틀림 각(yaw-angle)을 가지지 않는다는 가정과, 입구로부터 유입되는 바람이 균일한 분포를 가진다는 가정 하에 상당히 신뢰성 있는 결과를 예측할 수 있다. 엄격히 말하자면 BEM법은 2차원적 이론이기 때문에 블레이드 팁 손실, 실속이 발생하는 경우 등의 3차원적인 영향을 정확하게 반영하지 못하고, 설계초기단계에서 많은 가정을 통해야 함에도 불구하고, 로터 블레이드에 작용하는 하중과 공력특성을 예측하는데 상당히 신뢰성 있는 설계 기초 데이터를 제공하며, 설계자들이 로터 블레이드를 설계하는데 필요한 형상 및 최적 비틀림 각도 등의 설계 데이터 등을 제시하기도 한다. 따라서, CFD에 의한 해석결과와 BEM에 의한 해석 결과의 비교는 충분한 의미가 있다.

Fig. 5.11에 BEM에 의하여 예측된 T40/500 풍력발전 시스템의 전체 출력특성과 본 계산결과에 의하여 예측된 출력을 비교하여 나타

내었다. TSR이 약 7.2인 지점을 기준으로 7.2미만인 경우에는 본 계산결과가 BEM보다 출력을 낮게 예측하고 있으며, 7.2 이상인 경우에는 본 계산결과가 BEM 보다 출력을 높게 예측하고 있음을 알 수 있다. 전체적인 BEM에 의한 수치해석 결과와 본 연구에서의 결과 값은 대부분의 TSR에 있어서 10 % 내에서 일치하였다. 블레이드에서 발생하는 실속은 강한 3차원 박리를 수반하는 매우 복잡한 유동현상이므로 난류모델을 적용한 수치해석 기법으로 정확한 정량적인 데이터를 제시하는데는 상당한 어려움이 따른다. 본 계산결과의 경우 실제 출력은 TSR이 8.67인 경우까지 점점 증가하고 있으며, 8.67을 기준으로 점점 감소하는 경향을 보이며, BEM의 예측결과와 다소 차이를 보인다. 이는 현재까지 개발된 다양한 난류모델들이 블레이드 표면에서 발생하는 강한 3차원 실속현상을 정확하게 예측하기에는 아직 무리가 있기 때문이라고 많은 연구자들에 의하여 보고되고 있다. 난류모델의 선정에 대한 문제 외에도 해석을 하기 위한 격자 문제들을 수 있으며, 본 연구에서 사용한 격자의 수는 약 800,000 cell 정도로써, 실제 3차원 외부 유동장을 해석하는데 있어서 다소 충분하지 않은 수의 격자이다. 따라서, 보다 정확한 성능예측을 가능하게 하기 위하여, 다양한 난류모델을 적용하여 최적의 모델을 검토할 필요가 있으며, 계산에 사용된 격자를 생성하는데 있어, 보다 우수한 품질을 가지는 격자를 적용할 필요가 있고, 격자 수를 조정하여 반복계산을 수행할 필요가 있다.

Fig. 5.12 에는 BEM 법에 의하여 계산된 T40/500 로터 블레이드의 반경방향 국소 지점에서의 양력 계수 값을 나타내고 있다. 그래프를 살펴보면 TSR 이 3.85(40rpm)인 경우에 전체적으로 로터 블레이드에서 발생하는 양력계수 값이 높게 나타나고 있음을 알 수 있으며,

$r/R$  0.4 지점까지는 급격한 양력계수 감소경향을 나타내다가 0.4 이후의 위치에서는 완만한 곡선을 보이며 안정적인 경향을 나타내고 있다.

Fig. 5.13에는 반경방향 국소 지점에서의 항력 계수 값을 나타내고 있으며, TSR이 2.89인 경우의 항력계수 값이 다른 조건과 비교할 때 상당히 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고, Fig. 5.14, 5.15, 5.16에 BEM 법으로 계산된 T40/500 로터 블레이드의 추력계수, 토크계수, 동력계수 등의 값들을 블레이드의 반경방향으로의 국부적인 위치에 대한 값들을 그래프로 나타내었다.

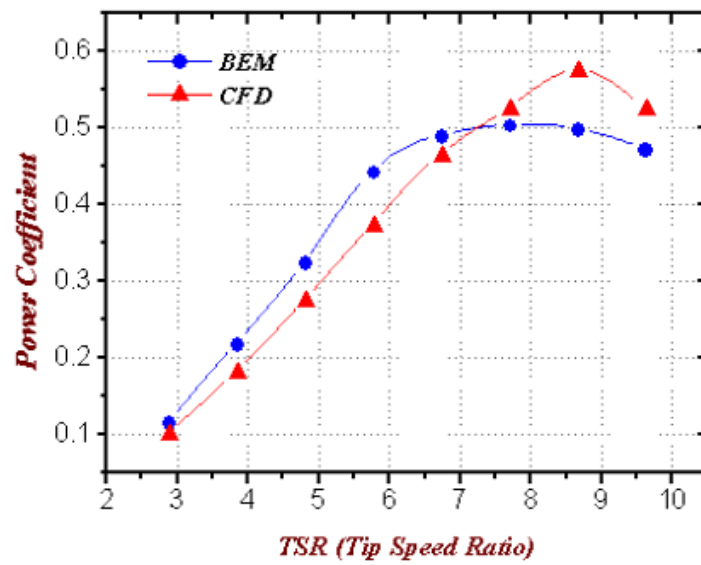


Fig. 5.11 Comparison of calculated and BEM power coefficient for the scaled T40/500

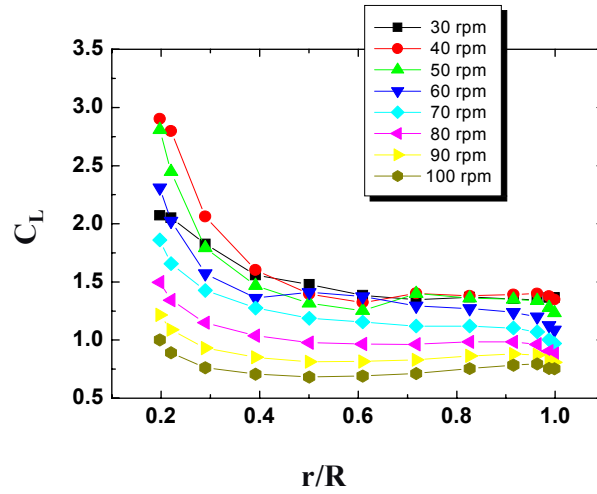


Fig. 5.12 Comparison of lift coefficient at each blade section

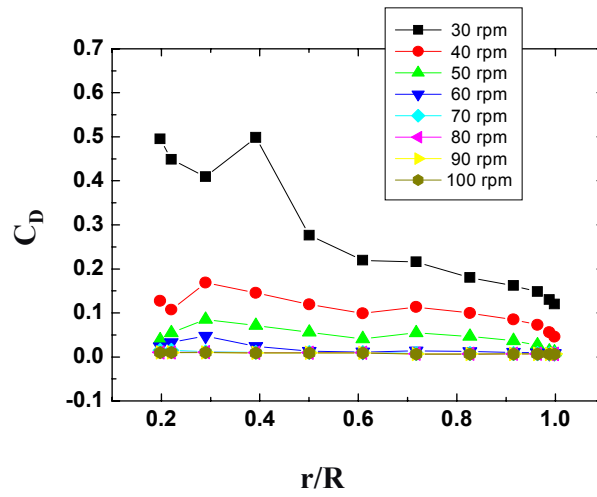


Fig. 5.13 Comparison of drag coefficient at each blade section

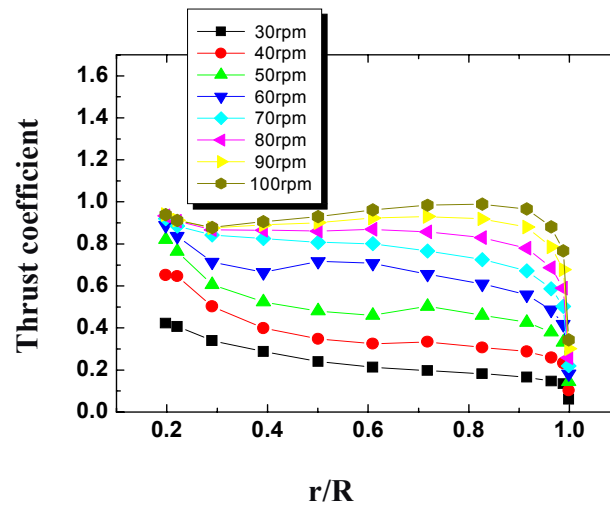


Fig. 5.14 Comparison of thrust coefficient at each blade section

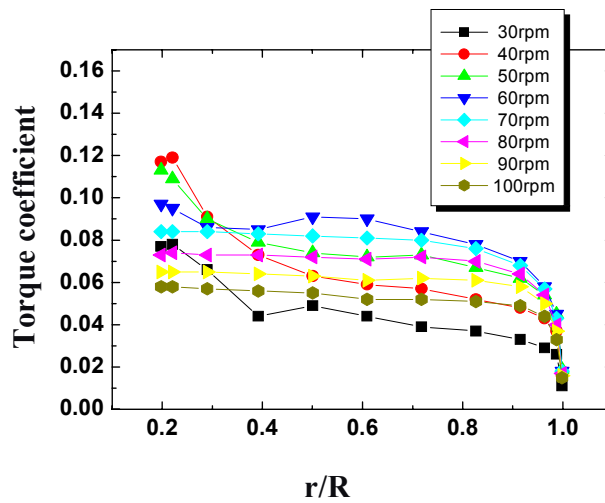


Fig. 5.15 Comparison of lift coefficient at each blade section



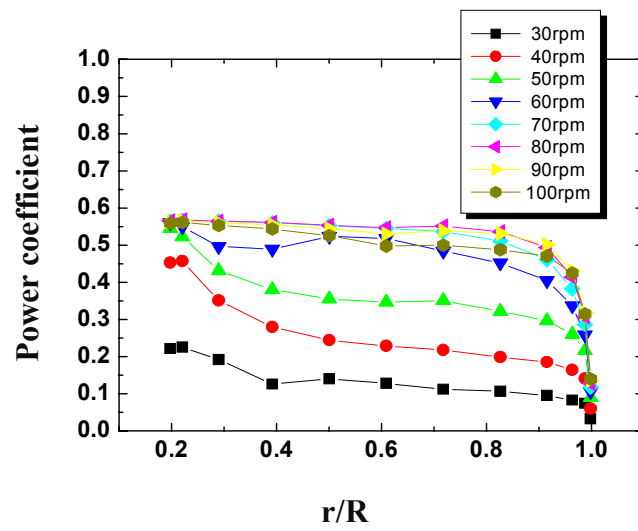


Fig. 5.16 Comparison of power coefficient at each blade section

## 제 6 장 CFD에 의한 2 블레이드 풍력발전용 터빈모델의 수치해석

앞장에서 언급한 바와 같이 풍력발전용 로터 블레이드를 설계하는 엔지니어의 입장에서는 설계된 로터 블레이드의 성능을 검증하는 단계에서, 매년 실험을 통해 그 성능을 평가하기란 거의 불가능한 작업이므로, 보다 신속하고 효율적인 피드백 설계방법이 절실히 요구된다. 최근들어 CFD 기법의 응용범위가 점점 확대됨에 따라, Riso (Denmark), DTU (Denmark), DLR (Germany), FFA (Sweden) 등의 연구기관에 의해서 CFD의 풍력발전용 로터 블레이드 3차원적 유동 특성 및 성능해석에 대한 적용성 평가에 관한 본격적인 연구가 시작되었다. 본 연구 이전에, 이미 델프트 대학의 풍력연구단에 의해 설계된 500 kW급 수평축 풍력발전용 터빈 블레이드에 대하여, 상용 CFD 코드인 CFX-TASCflow를 적용한 연구가 국내에서 최초로 시도되었다. 하지만, 보다 정확한 유동해석 및 성능평가를 위하여 우수한 품질의 계산 격자와 높은 정도의 수치해석 기법을 통하여 최적화된 수치해석적 연구의 필요성을 느끼게 되었으며, 설계시 필요한 양력·항력 데이터를 비교적 쉽게 확보할 수 있는 NACA 0012 익형으로 설계된 단순한 형상의 2블레이드 풍력터빈에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다.

본 연구의 목적은, 풍력발전용 로터 블레이드의 유동해석 및 성능평가를 위한 도구로써 상용 CFD 코드의 적용가능성을 평가함에 있으며, 이를 바탕으로 보다 효율적인 로터 블레이드 설계를 가능하게 하고자 함에 있다.

## 6-1 형상 모델링 및 계산격자

### 6-1-1 로터 블레이드 3-D 모델링

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 로터 블레이드는 DUT(Delft University of Technology)의 L.J. Vermeer에 의해 설계된 2 블레이드 타입 수평축 풍력발전용 로터 블레이드이다[20]. 반경이 0.6 m이고, 시위길이(chord length)는 0.08 m이며, 허브 연결부(root cutout)의 길이는 블레이드 반경의 30 %인 0.18 m에 해당한다. 허브와 블레이드를 연결하는 부분의 형상은 모델링의 단순화를 위하여 생략하였다. 블레이드 팁 부분으로부터 허브 부분으로 0.06 m 까지의 비틀림 각도  $\theta$ 는  $0^\circ$ 이며, 0.06 m 이후로 허브부분 까지의 비틀림 각도는 다음의 식 (6.1)을 따른다.

$$\theta(r/R) = (6^\circ + \theta_{Tip}) - 6.67 r/R \quad (6.1)$$

여기서,  $r/R$ 은 블레이드 반경  $R$ 과 국부 위치에서의 반경  $r$ 을 나타낸다.

식 (6-1)에 따라, 본 연구의 수치 해석 모델로 사용된 2 블레이드 타입의 로터 블레이드의 비틀림 각을 계산 할 수 있다. 로터 블레이드의 root cutout 부분에서의 비틀림 각은  $+ 4^\circ$ 이다. 모델링된 로터 블레이드의 상세 제원을 Table 6.1에 요약하여 나타내었으며, 3차원 전문 캐드 모델링 툴인 CATIA를 이용하여 모델링한 3차원 로터 블레이드의 형상을 Fig. 6.1에 나타내었다.

Table 6.1 Specifications of the model

Nummber of blade	2
Airfoil section	NACA 0012
Chord length	0.08 m
Radius	0.6 m
Root cutout	0.18 m(30 %)
Blade length	0.42 m
Replaceable tip	0.06 m, $\theta : 0^\circ$
Blade twist	
$\theta(r/R) = (6^\circ + \theta_{Tip}) - 6.67 r/R$	

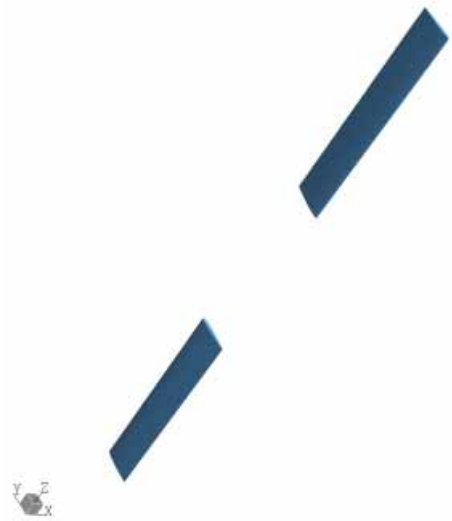


Fig. 6.1 3-D Rotor blade configuration (T40/500)

## 6-1-2 계산격자의 생성

수치해석 결과의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나가 계산 격자의 품질문제라고 할 수 있다. 본 연구에서는 복잡한 형상의 3차원 정렬 다중 블록 격자계(structured multi-block grid system)를 상당히 우수한 품질로 생성 할 수 있는 ICEM-CFD Hexa 모듈을 이용하여 생성하였다. 계산 격자를 생성함에 있어, 저 레이놀즈 수 난류 모델을 적용함에 따라 신뢰성 있는 해석결과를 확보하기 위해선 벽 근처 격자의 밀집도에 상당한 신경을 써야만 한다[21]. 따라서 본 연구에 사용된 격자계에서 로터 블레이드 표면에 집중된 첫 번째 격자 점은  $y+ \leq 2$ 로 하였다. 격자를 생성하는 과정에서 블레이드 주위의 격자 품질도를 높게 유지하기 위하여, 전체 도메인을 총 32 블록으로 구획하였으며, 블레이드를 감싸는 블록은 O-grid로 처리하였고, 다른 부분의 격자는 H-type 격자계로 구성하였다.

계산 PC의 계산 용량 문제로 반드시 생성 가능한 격자점 수의 한계가 발생한다. 블레이드 표면에 보다 조밀한 격자를 생성하기 위하여 전체 도메인을 기준으로 격자점을 제어 하다보면 상당히 많은 격자 점을 필요로 하나, 본 연구에서는 블레이드를 감싸는 O-grid 주변 격자점의 정보를 바탕으로, 격자 리파인먼트(mesh-refinement) 과정을 거쳐, 블레이드 주변 블록에만 초기에 생성된 격자보다 3배 더 조밀한 격자를 생성하였으며, 격자점은 Solver에서 제공하는 노드매칭(node matching) 기능인 arbitrary(GGI)를 이용하여 매칭시켰다. 전체 격자수는 540,000 개이다.

Fig. 6.2에 본 연구에 사용된 계산격자를 나타내었으며, Fig. 6.3에 블레이드 표면격자의 확대 모습을 나타내었다.

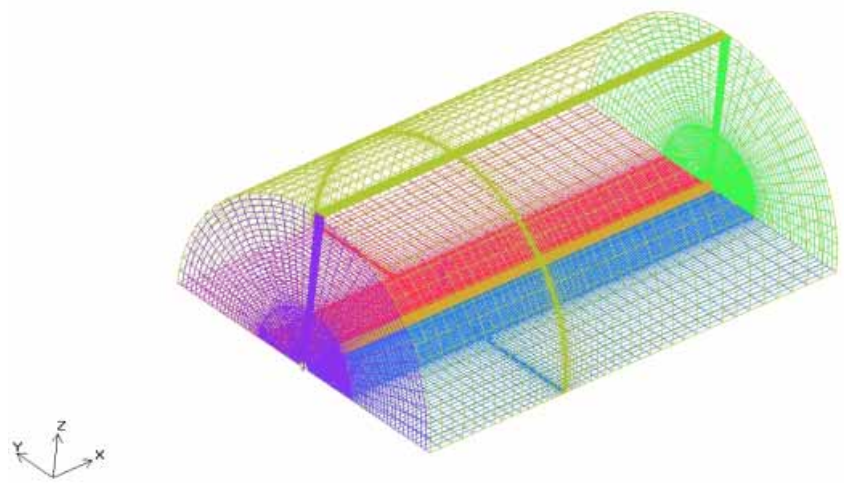


Fig. 6.2 Computational grid (full domains)

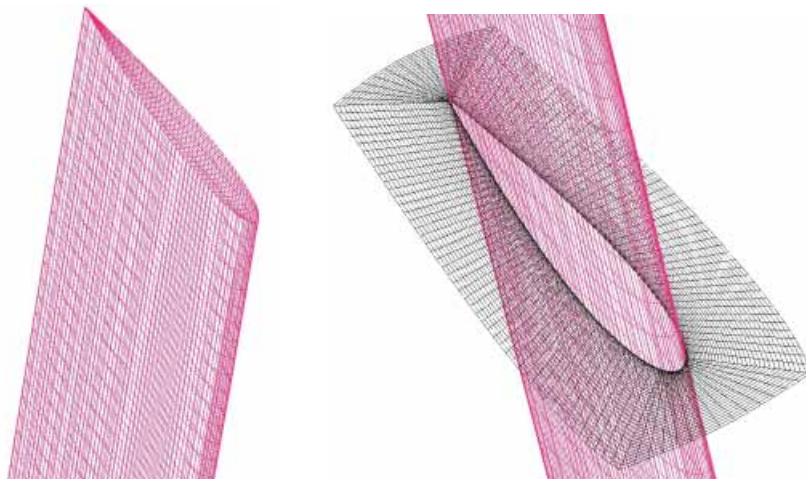


Fig. 6.3 Computational grid near the rotor

## 6-2 수치해석 기법 및 계산 조건

### 6-2-1 수치해석기법

CFX-TASCflow는 3차원 레이놀즈 평균 나비에 스톱스 (Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식을 적용하며, 지배방정식은 유한체적법에 (finite volume method, FVM) 의하여 이산화된다. 본 수치계산은 3차원 비압축성 정상상태 유동조건 하에서 수행되었다. 상용 CFD 코드에서 기본적으로 제공되는 표준  $k-\epsilon$  모델은, 저 레이놀즈 수를 갖는 유동의 표면박리 현상을 정확하게 예측할 수 없는 단점을 가지고 있다고 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 로터 블레이드 표면에서 발생하는 3차원적 유동박리 현상에 대한 영향을 반영하여, 표준  $k-\epsilon$  모델, 표준  $k-w$  모델에 비하여 비교적 정확한 예측이 가능하다고 알려져 있는 SST (shear stress transport)  $k-w$  모델을 적용하였다. 대류항의 이산화 기법으로는 2차정도의 정확도를 가지는 MLPS (modified linear profile skew)를 적용하였다.

### 6-2-2 경계 조건

입구조건으로써 균일 속도유입조건을 주었으며, 출구 조건은 출구영역으로 정의된 부분에 대기압력 조건을 부여하였으며, 전체 격자계는 블레이드와 허브를 포함하는 부분에 대해 회전하는 상대 좌표계로 설정하였다. 효율적인 계산을 위하여, 하나의 블레이드를 포함하는 영역에 대해서만 계산을 수행하였으며, 분할된 경계면은 주기조건으로 처리하였다.

### 6-2-3 계산조건

CFD의 풍력발전용 로터 블레이드 성능 평가에 대한 적용성 평가를 위하여, 동일한 형상으로 델푸트 대학 풍력에너지연구단에서 수행된 실험데이터와의 비교를 하였다. 실험 데이터에서는 TSR의 변화에 따른, 로터 블레이드의 동력계수를 나타내고 있으며, 이미 식 (5.1)에 정의된 TSR은 1~12의 범위를 가진다.

모든 계산은 Pentium 4 PC (1.7 GHz, 1GB RAM)에 의해 수행되었으며, 모든 계산은 반복계산이 약 150번 정도 내에서 원활히 수렴하였다. 계산에 앞서 원활한 해의 수렴성과 안정성을 위하여, 초기에 약 100,000 cell의 격자수를 가지는 격자 계에 대한 기초계산을 수행한 후 U, V, W 방향의 속도 성분과 대략적인 유동장의 기본정보를 획득하여 본 계산의 초기 조건으로 이용하였다.

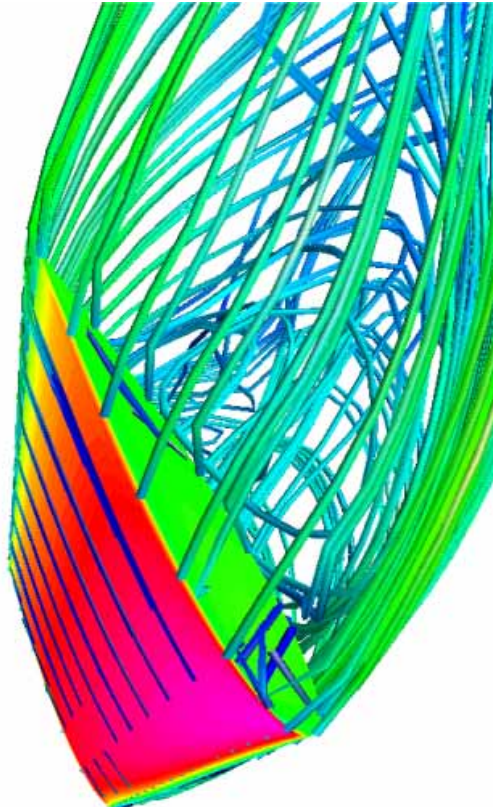
### 6-3 결과 및 고찰

풍력발전용 터빈의 성능해석에 있어서 3차원적 영향이라 함은 날개 끝 손실(tip loss)과 로터 블레이드 표면에서 발생하는 3차원적 실속을 대표적으로 들 수 있다. 항공기의 날개에서는 날개 상면(upper surface)과 하면(lower surface)의 압력 차에 의하여 날개 끝에서 와류(tip vortex)가 발생하게 된다. 이러한 날개 끝 와류에 대한 영향으로 날개주위의 순환(circulation) 분포가 감소되므로, 양력 손실이 발생하게 되며, 이는 풍력발전용 로터 블레이드의 경우에서도 동일하게 발생하는 현상이다. 이론적 성능 해석 기법 중 이러한 3차원적 날개 끝 손실에 대한 영향을 반영하고자, 실제 블레이드 길이의 97



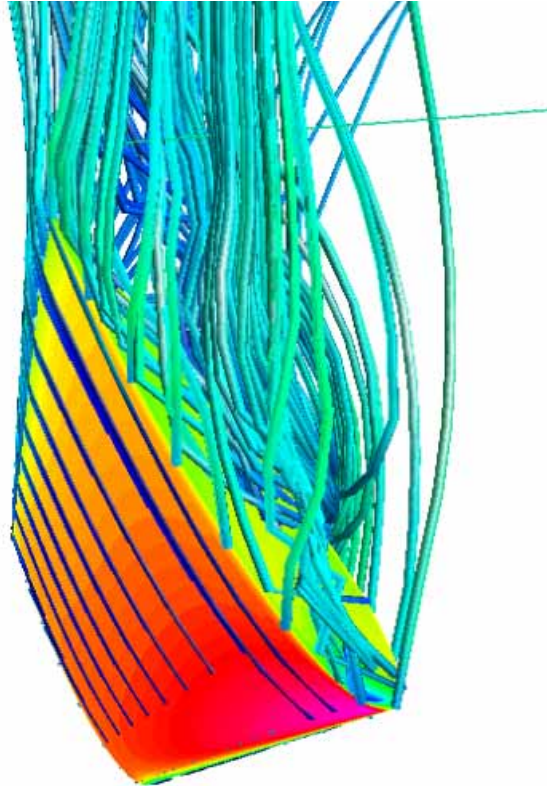
% 만을 고려하는 유효반경법, Prandtle과 Goldstein에 의해 제시된 날개 끝에서의 순환감소모델을 적용하여 계산하는 방법들이 있으며, 본 연구에서는 상용 CFD 코드를 이용한 로터 블레이드의 성능해석을 목적으로 하므로, CFD 해석결과에 의한 날개 끝 와류의 유동현상에 대하여 검토해 볼 필요가 있다.

Fig. 6.4에 회전하는 로터 블레이드의 팁 부분에서 발생하는 팁 와류에 대한 계산결과를 TSR이 1, 3, 5 일 때의 경우에 대하여 차례로 나타내었다. TSR이 1일 경우의 결과를 살펴보면, 회전속도가 8.333 rps로 상당히 저속회전을 하고 있으므로, TSR이 2, 3인 경우의 결과에 비하여, 복잡한 구조의 와류가 발생하고 있지 않고, TSR이 점점 증가할수록 로터 블레이드의 회전속도 또한 점점 증가하게 되므로, 날개의 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)에서의 압력차가 점점 커짐으로써, 팁 부분에서 발생하는 와류의 구조 또한 복잡한 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다.



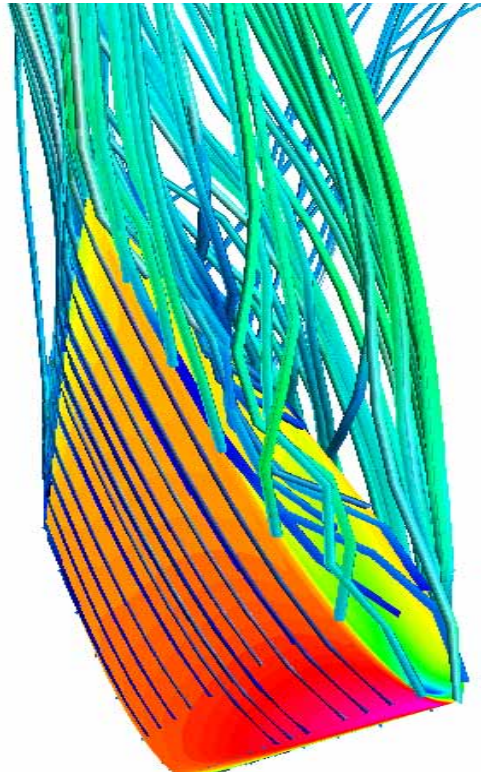
(a)  $TSR=1$

Fig. 6.4 Tip vortex ( $TSR=1, 3, 5$ )  
(to be continued)



(a)  $TSR=3$

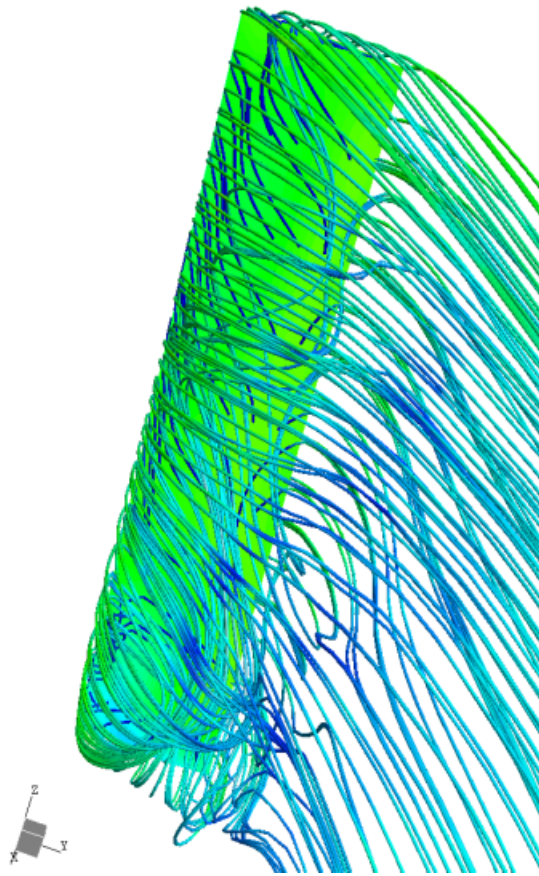
Fig. 6.4 Tip vortex ( $TSR=1, 3, 5$ )  
(to be continued)



(a)  $TSR=5$

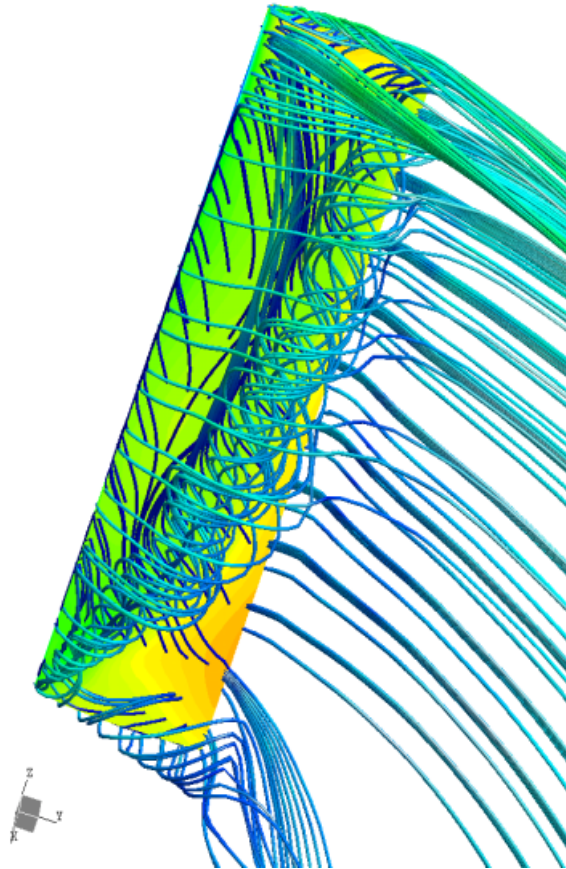
Fig. 6.4 Tip vortex ( $TSR=1, 3, 5$ )

또한, 풍력터빈의 성능을 저하시키는 중요한 원인으로써 앞장에서 이미 언급한, 로터 블레이드 표면에서 발생하는 3차원 실속현상이 있으며, 이는 3 블레이드 타입 블레이드 계산 결과와 상당히 유사한 패턴을 나타내고 있다. 블레이드 표면에서 발생하는 복잡한 3차원적 유동현상에 대해서는 제 5장의 블레이드 표면 3차원 실속현상에 상세히 기술하였다. 본 연구의 수치해석 결과를 Fig. 6.5에 나타내었다.



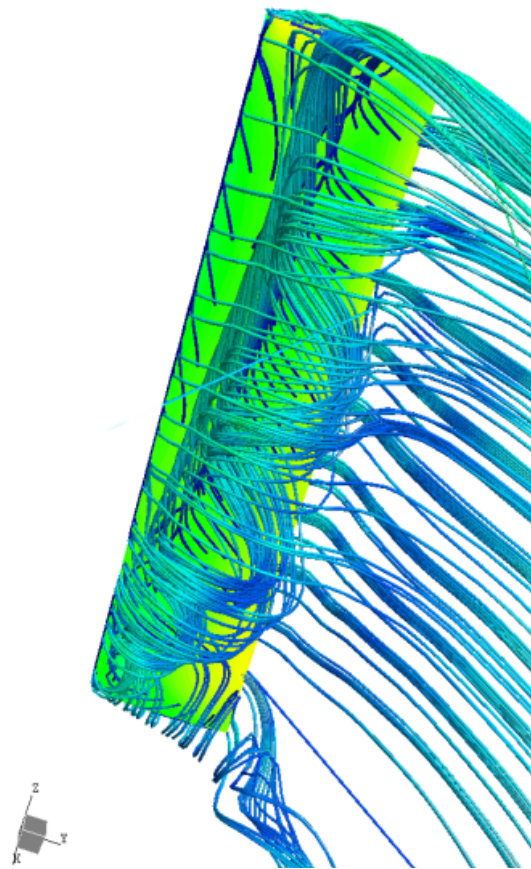
(a)  $TSR=1$

Fig. 6.5 Surface vortex distributions at a rotor blade  
(to be continued)



(b)  $TSR=3$

Fig. 6.5 Surface vortex distributions at a rotor blade  
(to be continue)



(b)  $TSR=5$

Fig. 6.5 Surface vortex distributions at a rotor blade



Fig. 6.6에 NREL(national renewable energy lab.)에 의해 수행된, 2 블레이드 풍력발전용 터빈의 후류 모습을 가시화 한 결과[22]를 나타내었다.

Fig. 6.7에 TSR 3인 경우의 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 수치해석 결과를 나타내었다.

Fig. 6.7에서 나타난 수치해석 결과를 살펴보면, 로터 블레이드 후방으로 발달하는 후류는 크게 로터 블레이드 끝단의 영향으로 발생하는 날개 끝 와류와 로터 블레이드 허브 쪽 끝단의 영향으로 발생하는 중심와류로 구분되어 짐을 알 수 있다. 두 가지 경우 모두 상당히 복잡한 3차원 유동구조를 보이고 있음을 알 수 있으며, Fig. 6.6에서 실험에 의해 제시된 날개끝 와류의 가시화 결과와 비교해볼 때, 본 계산에 의한 유동해석 결과는 상당히 만족스러운 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 6.6은 2 블레이드 로터 블레이드의 날개 끝의 영향으로 발생하는 후류의 모습만을 가시화 한 결과이므로, Fig. 6.7에서 제시한 수치해석 결과에서 나타난 중심 와류의 구조는 나타나고 있지 않음을 알 수 있다.



Fig. 6.6 Wake visualization(tip vortex) 10 m HAWT by NREL[22]

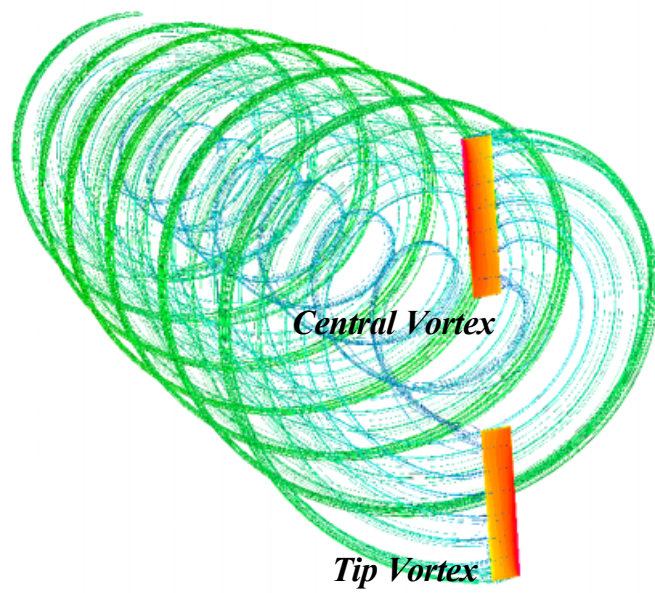


Fig. 6.7 Wake simulation result of 2 bladed HAWTs

## 제 7 장 결 론

본 연구는, 풍력발전용 터빈의 핵심 요소라고 할 수 있는 로터 블레이드의 설계기법 확립과 한국해양대학교내 풍력가용량 선정, 우수한 공력성능을 가지는 최적의 Gurney flap 선정, 3차원적 유동해석 및 성능평가를 위한 상용 CFD 코드의 적용성 검토에 관한 연구를 수행하였으며, 다음과 같이 요약 할 수 있다.

1. 선행된 한국해양대학교 내 풍력가용량에 관한 연구에서의 풍황 자료를 바탕으로 풍력발전에 적합한 데이터로 재 가공하여 제시하였으며, 평균풍속은  $4.76\text{ m/s}$ 이고, 동력계수( $C_p$ )값을 0.4, 기어박스의 기계적 효율( $\eta_m$ )은 0.9, 발전기의 효율( $\eta_g$ )을 0.9라고 했을 때, 단위 면적당 얻을 수 있는 에너지의량은  $32.78\text{ W/m}^2$  이다.

2. NACA 63<sub>2</sub>-215 익형 후연 끝단에 장착된 Gurney flap의 영향에 대하여 FLUENT 코드를 이용하여 수치해석적 연구를 수행하였으며, 105°각도로 설치된 2% 크기의 플랩이 장착된 경우 양력계수가 가장 높게 나타났고, 1.5% 크기의 90°플랩이 장착된 경우 가장 높은 양항비를 얻을 수 있음을 알 수 있었으며, 플랩이 장착되지 않은 경우의 익형보다, 코드길이의 0.5%~2% 크기의 플랩이 장착되는 경우 더욱 우수한 양항비를 얻을 수 있다.

3. 500kW급 3 블레이드 타입 수평축 풍력발전에 대하여, CFX-TASCflow 코드를 이용하여 수치해석적 연구를 수행하였고, 블레이

드 흡입면에서 발생하는 복잡한 구조의 실속현상은 이론적으로 제시된 유동구조와 서로 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 로터 블레이드에 대한 성능 평가를 수행하였으며, 델프트 대학에서 BEM 법으로 계산한 결과와 CFD 결과는 오차범위 10% 내에서 서로 일치하고 있음을 알 수 있었다.

4. 2블레이드 타입 수평축 풍력발전용 터빈의 후류 유동에 대한 수치해석 결과와 NREL에서 수행한 가시화 결과와 비교하였으며, 로터 블레이드 팁 부분의 영향으로 발달하는 팁 후류의 구조는 서로 상당히 유사한 형태를 보이고 있으며, 허브 쪽 끝단에 의한 영향으로 후방으로 강한 선회를 하며 발달하는 중심와류에 대한 영향도 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Paul Gipe, "Wind Energy Comes of Age", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
- [2] 한국해양대학교 해양클린에너지연구단, "풍력/태양광발전 기획과제 결과 보고서", 한국해양대학교, 2002.
- [3] Kentfield J.A.C., "Theoretically and Experimentally Obtained Performance of Gurney Flap Equipped Wind Turbines", Wind Engineering, Vol. 18, No. 2, 1994, pp.63-74.
- [4] Guy D., Philippe G., and Jean L., "Gurney Flap Scaling for Optimum Lift to Drag Ratio", AIAA Journal, Vol. 35, No. 12, 1997, pp.1888-1890.
- [5] Duquet. E.P.N., Van Dam. C.P., Brodeur. R.R. and Chao. D.D., "Navier-Stokes Analysis of Time Dependence Flows about a Wind Turbine", Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Engineering Conference, July 18-23, 1999.
- [6] Yutaka Hasegawa, Kai Karikomi and Koji Kikuyama, "Numerical Analysis of Yawed Inflow Effects on a HAWT Rotor", 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, California, 1999, FEDSM99-S295-9.
- [7] Gustave P. Corten, "Inviscid Stall Model", Proceedings of European Wind Energy Conference, Denmark, 2001, pp.466-469.
- [8] Gordon Leishman J., "Challenges in Modelling the Unsteady Aerodynamics of Wind Turbines", 21st ASME Wind Energy Symposium and the 40th AIAA Aerospace Science Meeting, Reno, NV, 2002.
- [9] Ashraf Ali Omar, "수평축 회전익의 성능해석", 서울대학교 석사학위논문, 1994.
- [10] 이동현, "풍력터빈용 날개의 공력해석 및 설계에 관한 연구", 제

주대학교 석사학위논문, 1999.

- [11] <http://www.windenergy.citg.tudelft.nl>
- [12] 설동일, “한국해양대학교내 풍력가용량 선정에 대한 연구”, 한국해양대학교 졸업논문집, 2001.
- [13] “Wind Energy-The Facts, Technology”, Vol. 1, European Commission, 2000, pp.88-92.
- [14] Erich Hau, “Wind Turbines”, Springer, 2001, pp.92-93.
- [15] <http://www.windpower.dk>
- [16] 이봉준, 김학봉, 김문상, “항공역학”, 도서출판 세화, 2002, pp.26-27.
- [17] Johansen J., Srensen N.N. and Hansen M.O.L., “CFD Vortex Generator Model”, Proceedings of the European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001. pp. 443-449.
- [18] Storms B.L., Jang C.S., “Lift Enhancement of an Airfoil Using a Gurney Flap and Vortex Generators”, Journal of Aircraft, Vol.31, No.3, 1994, pp.542-547.
- [19] Spalart. P.R., and Allmaras. S.R., “A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows”, La Recherche Aerospatiale, No.1, 1994, pp.5-21.
- [20] Vermeer L.J, “A Review of Wind Turbine Wake Research at TU-DELFT,” AIAA-2001-0030
- [21] “CFX-Tascflow Tutorial Documentation”, AEA Technology Engineering Software Ltd., 2001, pp.84-89.
- [22] Simoes, F. J and Graham, J. M. R., “A Free Vortex Model of the Wake of a HAWT,” Proc. of 12th British WEAC, 1990, pp.161-165.